

257 | Februar 1970

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

P. Boese

Untersuchung des Seegangsverhaltens von Katamaran-Schiffen unter Benutzung moderner Methoden der Seegangstheorie

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 257

Untersuchung des Seegangsverhaltens von Katamaran-Schiffen
unter Benutzung moderner Methoden der Seegangstheorie

von

P. Boese

Hamburg, Februar 1970

Untersuchung des Seegangsverhaltens von Katamaran - Schiffen
unter Benutzung moderner Methoden der Seegangstheorie *)

Einführung

In jüngster Zeit wurde immer häufiger die Möglichkeit diskutiert, das Katamaran - Prinzip nicht nur bei Sportbooten, sondern auch bei Berufsfahrzeugen zu verwenden. Die erhofften Vorteile gegenüber herkömmlichen Schiffen sind:

- a) Größere Decksfläche als Arbeitsplattform (z.B. bei Fischereifahrzeugen, bei Forschungs- und Werkstattschiffen) oder als Staufläche für sperrige Ladung (z.B. bei Fähren und Containerschiffen).
- b) Geringere Antriebsleistung bei hohen Geschwindigkeiten.
Da die Querstabilität aufgrund der Verdrängungsaufspaltung sehr groß ist, können die Rümpfe selbst sehr schlank und schmal gehalten werden. Man hofft dadurch, die bezüglich des Wellenwiderstandes kritischen Geschwindigkeiten mit erträglichen Leistungsaufwand überwinden zu können.
- c) Besseres Verhalten im Seegang.

Bevor auf den letzten Aspekt näher eingegangen wird, sollen kurz die Ergebnisse einiger bisheriger Untersuchungen über das Widerstandsverhalten von Katamaran - Schiffen aufgeführt werden.

Die Hoffnungen hinsichtlich einer Leistungersparnis haben sich nur teilweise erfüllt. Das liegt einmal darin, daß der Rumpfabstand relativ groß sein muß ($b/L > 0.3$), um einen zusätzlichen Widerstand durch ungünstige gegenseitige Beeinflussung der Rümpfe zu vermeiden [1, 2] .

*) Die hier mitgeteilten Ergebnisse wurden in einer am Lehrstuhl für Schiffstheorie, Institut für Schiffbau, Hamburg, angefertigten Diplomarbeit Nr.B255/48 von Dipl.-Ing. H.-H. Brand gewonnen.

Zum anderen wird die Ersparnis an Wellenwiderstand durch die vergrößerte benetzte Oberfläche und dem damit verbundenen Zuwachs an Reibungswiderstand wieder wettgemacht. Erst bei für Handelsschiffe sehr hohen Froude-Zahlen ($F_N > 0.31 \div 0.35$) kann mit einem merk- baren Vorteil gegenüber Einrumpfschiffen gerechnet werden [2, 3] . Hier fragt sich allerdings, ob für schnelle Handelsschiffe wirklich schon alle Möglichkeiten zur Widerstandersparnis durch unkonventio- nelle Abmessungsverhältnisse (z.B. große Schlankheitsgrade oder klei- ne Völligkeiten bei großen B/T-Verhältnissen) ausgeschöpft sind.

Eine eingehendere Behandlung dieser Fragen ist jedoch immer nur im Zusammenhang mit Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für eine konkre- te Projektaufgabe möglich. Hierzu muß in der Regel das gesamte Transportsystem in die Betrachtung mit einbezogen werden, was bei- spielsweise schon aus der Tatsache zu ersehen ist, daß für ein un- konventionell breites Fahrzeug neue Umschlags- und Dockanlagen not- wendig werden.

Untersuchte Fahrzeuge

In einer kürzlich erschienenen umfassenden Arbeit über Katamaran- Schiffe [3] sind für eine Reihe von Fahrzeugen mit unterschiedli- chem Verwendungszweck dem herkömmlichen Einrumpfschiff Katamaran - Entwürfe als Alternative gegenübergestellt worden. Für die hier vor- genommenen Untersuchung wurden die Entwürfe für ein Containerschiff von 1450 20'-Containern und mit einer Geschwindigkeit von 22 kn aus- gewählt. Die Länge des Einrumpfschiffes beträgt $L_{pp} = 216$ m, dem- gegenüber kann der Katamaran bei gleichem Containerstauraum kürzer sein ($L_{pp} = 183$ m). Die erforderliche Antriebsleistung liegt jedoch - wie bei dieser Geschwindigkeit ($F_N \approx 0.24 \div 0.27$) zu erwarten war - wesentlich über der des Einrumpfschiffes. Obwohl also das Ka- tamaran - Prinzip in diesem Falle keinesfalls lohnend wäre, soll das Seegangsverhalten dieser Entwürfe näher untersucht werden. Hierbei interessiert vor allem die Auswirkungen der Verdrängungsaufspaltung überhaupt, sowie der Breite des Fahrzeuges. Zu diesem Zweck soll der Rumpfabstand des Katamaran - Entwurfs in drei Stufen variiert werden.

Die Rümpfe selbst behalten in allen drei Fällen die gleiche Form. Weitere Daten der Entwürfe finden sich in der Tabelle Abb. 1.

Seegangsverhalten

Der Begriff Seegangsverhalten eines Schiffes setzt sich aus einer Vielzahl von Komponenten zusammen. Ein großer Teil dieser Komponenten kann jedoch aus der Vertikalbewegung einzelner Punkte des Schiffskörpers abgeleitet werden. Hierzu gehören Seegangseffekte, die sowohl für die Wirtschaftlichkeit eines Schiffes als auch für die Sicherheit von Schiff und Ladung entscheidend sind: Das Auftreten von Bodenstößen, das An - Deck - Kommen von Wasser und Propellerdurchgehen, weiterhin die Vertikalbeschleunigungen und schließlich die Schnittkräfte , Druckkräfte bzw. Druckbelastungen des Schiffskörpers. Auch die Widerstandserhöhung im Seegang ist hauptsächlich durch die Vertikalbewegungen bestimmt.

Um bei der Vielfalt der Seegangsbedingungen, denen ein Schiff während seiner Lebensdauer begegnen kann, eine stichhaltige quantitative Aussage machen zu können, muß eine große Zahl von Bewegungsdaten des Schiffes bekannt sein. Daher sollte man soweit wie möglich den aufwendigen Modellversuch durch theoretische Rechenverfahren ersetzen, Eine Untersuchung, wie sie hier vorgenommen wurde, hätte sich auf experimentellem Wege wegen des Kostenaufwandes sicher nicht verwirklichen lassen.

Da bisher keine Berechnungsverfahren für die Bewegung von Katamaran-Schiffen vorlagen, wurde das am Institut für Schiffbau, Hamburg, vorliegende Programm zur Berechnung der Tauch- und Stampfbewegung [4] für Doppelrumpfschiffe abgewandelt. Die Ermittlung der hydrodynamischen Kräfte beruht auf der Streifenmethode, deren Brauchbarkeit bereits anhand zahlreicher Vergleiche mit experimentellen Ergebnissen nachgewiesen wurde. Bei der Anwendung der Streifenmethode auf Katamaran - Schiffe sind in dem hier beschriebenen ersten Ansatz einige Vernachlässigungen vorgenommen worden, sodaß auch in diesem Falle eine Kontrolle durch das Experiment wünschenswert wäre.

Vertikale Bewegung

Beim Einrumpfschiff setzen sich die Vertikalbewegungen vor allem aus der Tauch- und Stampfbewegung zusammen. Demgegenüber ist der Einfluß der Rollbewegung vernachlässigbar, da selbst bei großen Rollwinkelamplituden die Wege und Beschleunigungen relativ klein sind.

Diese Vernachlässigung ist beim Katamaran wegen der großen Breite nicht zulässig. Die Vertikalbewegung irgend eines Punktes des Schiffes mit den Koordinaten x, y (s. Abb. 2) lautet:

$$z(x, y, t) = z_0(t) + x\theta(t) - x\varphi(t)$$

$z_0(t)$ Tauchbewegung in der Fahrzeugmittellinie am Hauptspant

$\theta(t)$ Stampfwinkel

$\varphi(t)$ Rollwinkel

Auf die Methode zur Berechnung der Bewegungen soll im Folgenden nur soweit eingegangen werden, wie Unterschiede zum Einrumpfschiff auftreten.

a) Bewegungsgleichungen

Die auf einen 'zweidimensionalen Abschnitt' Δx des Rumpfes wirkenden vertikalen äußeren Kräfte denke man sich verursacht durch die Bewegung im glatten Wasser

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz$$

a Massenkoeffizient

(Körpermasse + hydrodyn. Masse)

b Dämpfungskoeffizient

(Energieverlust durch abgestrahlte Wellen)

c Rückstellkoeffizient

(hydrostat. Auftrieb)

und durch die Wirkung der Wellen

$$(f_{z1} - if_{z2}) e^{i\omega_e t}$$

f_{z1}, f_{z2} Komponenten der komplexen Kraftamplitude

$\omega_e = \omega - kV \cos \mu$ Begegnungsfrequenz

$k = \omega^2/g$ Wellenzahl

Die Koeffizienten der hydrodynamischen Kräfte sind sowohl von der Frequenz als auch von der Geschwindigkeit abhängig [4] .

Werden die auf das Schiff wirkenden Kräfte integriert, so muß berücksichtigt werden, daß in unserem Falle zwei gleiche Rümpfe einen Beitrag leisten. Die Gleichgewichtsbedingungen für die Vertikalkräfte, die Stampfmomente und die Rollmomente lauten:

$$A_{ZZ}\ddot{z}_0 + B_{ZZ}\dot{z} + C_{ZZ}z + A_{Z\theta}\ddot{\theta} + B_{Z\theta}\dot{\theta} + C_{Z\theta}\theta + A_{Z\varphi}\ddot{\varphi} + B_{Z\varphi}\dot{\varphi} + C_{Z\varphi}\varphi = (F_{Z1} - iF_{Z2})e^{i\omega_e t}$$

$$A_{\theta Z}\ddot{z}_0 + B_{\theta Z}\dot{z} + C_{\theta Z}z + A_{\theta\theta}\ddot{\theta} + B_{\theta\theta}\dot{\theta} + C_{\theta\theta}\theta + A_{\theta\varphi}\ddot{\varphi} + B_{\theta\varphi}\dot{\varphi} + C_{\theta\varphi}\varphi = (M_{\theta 1} - iM_{\theta 2})e^{i\omega_e t}$$

$$A_{\varphi Z}\ddot{z}_0 + B_{\varphi Z}\dot{z} + C_{\varphi Z}z + A_{\varphi\theta}\ddot{\theta} + B_{\varphi\theta}\dot{\theta} + C_{\varphi\theta}\theta + A_{\varphi\varphi}\ddot{\varphi} + B_{\varphi\varphi}\dot{\varphi} + C_{\varphi\varphi}\varphi = (M_{\varphi 1} - iM_{\varphi 2})e^{i\omega_e t}$$

b) Koeffizienten der linken Seiten:

$$\begin{array}{lll} A_{ZZ} = 2 \int_L a \, dx & B_{ZZ} = 2 \int_L b \, dx & C_{ZZ} = 2 \int_L c \, dx \\ A_{Z\theta} = 2 \int_L x a \, dx & B_{Z\theta} = 2 \int_L x b \, dx & C_{Z\theta} = 2 \int_L x c \, dx \\ A_{\theta Z} = 2 \int_L x a \, dx & B_{\theta Z} = 2 \int_L x b \, dx & C_{\theta Z} = 2 \int_L x c \, dx \\ A_{\theta\theta} = 2 \int_L x^2 a \, dx & B_{\theta\theta} = 2 \int_L x^2 b \, dx & C_{\theta\theta} = 2 \int_L x^2 c \, dx \\ A_{\varphi\varphi} = \left(\frac{b}{2}\right)^2 \int_L a \, dx & B_{\varphi\varphi} = \left(\frac{b}{2}\right)^2 \int_L b \, dx & C_{\varphi\varphi} = \left(\frac{b}{2}\right)^2 \int_L c \, dx \end{array}$$

Alle übrigen Koeffizienten entfallen, da das Fahrzeug symmetrisch zur x-Achse ist. Die Folge dieser Symmetrieeigenschaft ist, daß die Tauch- und Stampfbewegung nicht mit der Rollbewegung gekoppelt ist. Die Gleichung für die Rollbewegung kann also gesondert behandelt werden.

Bei der Berechnung der Massenträgheitsmomente (Koeffizienten $A_{\theta\theta}$ und $A_{\varphi\varphi}$) muß berücksichtigt werden, daß sich die Körpermasse auf die Rümpfe und die Brücke verteilt. Hierzu wird angenommen, daß der Trägheitsradius des Längenträgheitsmomentes für alle Entwürfe $i_{\theta\theta} = 0.25 L$ ist. Zur Bestimmung von $i_{\varphi\varphi}$ wird demgegenüber berücksichtigt, daß mit zunehmender Fahrzeugbreite der Anteil der Brücke am Trägheitsmoment zunimmt.

Der Einfluß, den die Drehung der beiden Rümpfe um ihre Längsachse auf die Rollmomente besitzt, wird bei dieser Betrachtung vernachlässigt, da die aus der Vertikalbewegung resultierenden Momente auf das Fahrzeug weit überwiegen. Ferner wird weder bei der Bewegung im glatten Wasser noch beim Vorhandensein der Wellen eine gegenseitige hydrodynamische Beeinflussung der Rümpfe berücksichtigt.

c) Erregende Kräfte und Momente

Die Seegangserhebung am Ort eines 'Streifens' wird durch folgende Funktion beschrieben:

$$\xi(x_s, t) = \xi_A e^{i(\omega_e t - k x_s)}$$

mit

$$x_s = x \cos \mu + y \sin \mu$$

ergibt sich

$$\xi(x, y, t) = \xi_1 e^{-ik(x \cos \mu + y \sin \mu)} e^{i\omega_e t}$$

Die Vertikalkraft des Seeganges auf jeden 'Streifen' ist proportional der Wellenerhebung, liegt aber nicht in Phase mit ihr. Der Koeffizient des Anteils der in Phase mit der Erhebung liegt ist k_r und der des um 90° phasenverschobenen Anteils k_i . Beide Anteile lassen sich nach der Theorie von Grim berechnen. Beide Komponenten der komplexen Vertikalkraftamplitude lauten somit:

$$F_{z1} = \xi_A \left\{ k_r \cos [k(x \cos \mu + y \sin \mu)] - k_i \sin [k(x \cos \mu + y \sin \mu)] \right\}$$

$$F_{z2} = \xi_A \left\{ k_r \sin [k(x \cos \mu + y \sin \mu)] + k_i \cos [k(x \cos \mu + y \sin \mu)] \right\}$$

Für den Steuerbordrumpf ist $y = +b/2$, für den Backbordrumpf $y = -b/2$. Die entsprechenden Kraftkomponenten sind mit f_{z1sb} , f_{z2sb} und f_{z1bb} , f_{z2bb} bezeichnet.

Auf das gesamte Fahrzeug wirken die Kräfte und Momente:

$$\begin{aligned} F_{z1} &= \int_L f_{z1sb} dx + \int_L f_{z1bb} dx & F_{z2} &= \int_L f_{z2sb} dx + \int_L f_{z2bb} dx \\ M_{\theta 1} &= \int_L x f_{z1sb} dx + \int_L x f_{z2bb} dx & M_{\theta 2} &= \int_L x f_{z2sb} dx + \int_L x f_{z2bb} dx \\ M_{\varphi 1} &= \frac{b}{2} \int_L f_{z1sb} dx - \frac{b}{2} \int_L f_{z1bb} dx & M_{\varphi 2} &= \frac{b}{2} \int_L f_{z2sb} dx - \frac{b}{2} \int_L f_{z2bb} dx \end{aligned}$$

d) Lösungen

Die periodischen Lösungen für die gesuchten Bewegungen lauten in komplexer Form:

$$\begin{aligned} z_0(t) &= (z_{01} - iz_{02}) e^{i\omega_e t} \\ \theta(t) &= (\theta_1 - i\theta_2) e^{i\omega_e t} \\ \varphi(t) &= (\varphi_1 - i\varphi_2) e^{i\omega_e t} \end{aligned}$$

Für diesen Ansatz liefern die ersten zwei Bewegungsgleichungen die Komponenten der Tauch- und Stampfamplitude, und die dritte Gleichung die Komponenten der Rollamplitude. Hier sollen die Bewegungsamplituden in Form von sog. Übertragungsfunktionen, d.h. bezogen auf die Wellenamplitude, benutzt werden:

$$\begin{aligned} Y_{z01} &= z_{01} / \xi_A & Y_{z02} &= z_{02} / \xi_A & Y_{z0} &= \sqrt{Y_{z01}^2 + Y_{z02}^2} \\ Y_{\theta 1} &= \theta_1 / \xi_A & Y_{\theta 2} &= \theta_2 / \xi_A & Y_{\theta} &= \sqrt{Y_{\theta 1}^2 + Y_{\theta 2}^2} \\ Y_{\varphi 1} &= \varphi_1 / \xi_A & Y_{\varphi 2} &= \varphi_2 / \xi_A & Y_{\varphi} &= \sqrt{Y_{\varphi 1}^2 + Y_{\varphi 2}^2} \end{aligned}$$

Kennzeichnende Bewegungsgrößen

Wie bereits erwähnt, ist die Größe der Vertikalbewegung an einzelnen Punkten des Schiffes kennzeichnend für die Seegangseigenschaften. Um bei der Vielzahl der Vergleichsmöglichkeiten die Übersichtlichkeit zu wahren, wird im Folgenden die Vertikalbewegung nur an einem prägnanten Punkt des Schiffes betrachtet.

Hierfür bietet sich der äußerste und vorderste Punkt der Lade - Decksfläche (x_L, y_L) an. Da die (Container-) Ladung sowohl durch Beschleunigungskräfte, als auch durch überkommendes Wasser gefährdet ist, sollen sowohl die Vertikalbeschleunigung als auch die Relativbewegung zwischen Schiff und Wasseroberfläche an dieser Stelle betrachtet werden. Daß etwa an der gleichen Stelle die Gefahr des Auftretens von Bodenstößen (slamming) und des Seeschlagens gegen die Unterseite der Brücke am größten ist, spricht außerdem für die Wahl dieses Punktes. Es muß noch erwähnt werden, daß immer die ungünstigste Seite, d.h. bei See von Backbord die Backbordseite betrachtet wird.

In Form der Übertragungsfunktion lautet die Vertikalbeschleunigung $\ddot{Z}$:

$$Y_{\ddot{Z}} = \ddot{Z}_A / \xi_A = \sqrt{Y_{\ddot{Z}1}^2 + Y_{\ddot{Z}2}^2}$$

$$Y_{\ddot{Z}1} = \omega_e^2 (Y_{Z01} + x_{2L} Y_{\theta 1} + y_{2L} Y_{\varphi 1})$$

$$Y_{\ddot{Z}2} = \omega_e^2 (Y_{Z02} + x_{2L} Y_{\theta 2} + y_{2L} Y_{\varphi 2})$$

Die Relativbewegung s ergibt sich, indem von der Vertikalbewegung die Wellenerhebung subtrahiert wird:

$$Y_s = s_A / \xi_A = \sqrt{Y_{s1}^2 + Y_{s2}^2}$$

$$Y_{s1} = Y_{Z01} + x_L Y_{\theta 2} + y_L Y_{\varphi 1} - \cos[K(x_L \cos \mu + y_L \sin \mu)]$$

$$Y_{s2} = Y_{Z02} + x_L Y_{\theta 2} + y_L Y_{\varphi 2} - \sin[K(x_L \cos \mu + y_L \sin \mu)]$$

Ergebnisse für regelmäßige Wellen

Für die erste Breitenvariante des Katamaran - Entwurfs mit $b/L = 0.16$ sind in Abb. 3 - 7 die Übertragungsfunktionen für Tauchen, Stampfen und Kollen, sowie für die Vertikalbeschleunigung und die Relativbewegung an dem ausgewählten Punkt (x_L, y_L) aufgetragen. In allen Fällen ist die Entwurfsgeschwindigkeit von 22 kn zugrundegelegt worden.

Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Bewegungsamplituden nicht nur von der Wellenlänge, sondern auch vom Kurs. Für $\mu = 0$ (See von achtern) und $\mu = 180^\circ$ (See von vorn) sind die Ergebnisse unabhängig vom Rumpfabstand. Dies gilt auch für den Grenzfall Rumpfabstand $\rightarrow 0$, d.h., für ein Einrumpfschiff mit der Form der Katamaranrümpfe. Vergleicht man die Übertragungsfunktionen für $\mu = 180^\circ$ des Katamaran - Einzelrumpfes mit denen des konventionellen Einrumpfschiffes (Abb. 8 und 9), so stellt man bereits hier einen wesentlichen Unterschied fest. Wegen des kleinen B/T - Verhältnisses des Katamaran - Rumpfes ist die Dämpfung der Bewegungen geringer als beim wesentlich breiteren Einrumpfschiff. Die Folge sind größere Bewegungsamplituden des Katamaran - Rumpfes.

Auch auf allen übrigen Kursen ist das Einrumpfschiff günstiger als der Katamaran - Einzelrumpf. Betrachtet man jedoch nicht den einzelnen Rumpf des Katamarans, der aufgrund seiner geringen Stabilität ohnehin nicht schwimmfähig sein dürfte, sondern die Katamaran - Varianten I, II und III, so stellt man fest, daß die Tauch- und Stampfbewegungen mit zunehmender Breite günstiger werden. Dieser Effekt beruht darauf, daß bei schräger See die erregenden Kräfte auf jeden der Rümpfe gegeneinander phasenverschoben sind und somit geringere Bewegungen hervorrufen.

Für die letztlich interessierenden Bewegungsgrößen Vertikalbeschleunigung und Relativbewegung wird dieser günstige Effekt allerdings zum Teil dadurch verdeckt, daß die Rollbewegung hinzukommt und diese Bewegungsgrößen verstärkt.

Wegen der großen Zahl von Fällen, die es zu vergleichen gilt, ist eine schlüssige Beurteilung der verschiedenen Varianten nur möglich,

wenn die Datenflut zu wenigen prägnanten Werten konzentriert wird. Dies ist mit Hilfe der Seegangsstatistik möglich.

Seegangsstatistik

Man unterscheidet im allgemeinen zwischen Kurzzeitstatistik und Langzeitstatistik. Die Kurzzeitstatistik ermöglicht Wahrscheinlichkeitsaussagen über eine beliebige linear vom Seegang abhängige Größe - in unserem Beispiel Vertikalbeschleunigung und Relativbewegung - für das mit konst. Geschwindigkeit und Kurs in einem gegebenen stationären Seegang fahrende Schiff. Diese Aussagen können z.B. für die Schiffsführung interessant sein, wenn sie die Situation des Schiffes in einem vorhandenen oder zu erwartenden Seegang beurteilen soll.

Besteht demgegenüber die Aufgabe darin, ganz allgemein das Seegangsverhalten eines Schiffsentwurfs zu beurteilen, so müssen alle während seiner Lebensdauer auftretenden Seegangsbedingungen berücksichtigt werden. Dies geschieht mit Hilfe der sog. Langzeitstatistik.

Kurzzeitstatistik

Der natürliche kurzkämmige Seegang wird mit Hilfe des Richtungsspektrums S_{ζ} beschrieben:

$$\xi(t) = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \int_0^{\infty} \sqrt{2 S_{\zeta}(\omega, \mu_1)} d\omega d\mu_1 \cos(\omega t + \phi)$$

μ_1 ist nach Abb. 10 die Richtung der jeweiligen Elementarwelle bezogen auf die mittlere Laufrichtung μ_v des Seeganges.

Von Pierson [5] wird folgendes Richtungsspektrum angegeben:

$$S_{\zeta}(\omega, \mu_1) = \frac{1}{\pi} \left\{ 1 + \left[0,50 + 0,82 e^{-1/2 \left(\frac{\omega W}{g} \right)^4} \right] \cos^2 \mu_1 + 0,32 e^{-1/2 \left(\frac{\omega W}{g} \right)^4} \cos^4 \mu_1 \right\} S_{\zeta_0}(\omega)$$

W = Windgeschwindigkeit [kn]

Im Folgenden wird jedoch die einfachere von der Frequenz unabhängige Richtungsverteilung benutzt, wie sie von der ITTC vorgeschlagen wird:

$$S_{\zeta}(\omega, \mu_1) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \mu_1 S_{\zeta_0}(\omega)$$

Als Grundform dient das zwei-parametrische Moskowitz - Pierson Seegangsspektrum:

$$S_{\xi_0}(\omega) = 0,11 \left(\frac{2\pi}{T_v \omega} \right)^4 \frac{\tilde{H}_{1/3}^2}{\omega} e^{-0,44 \left(\frac{2\pi}{T_v \omega} \right)^4}$$

Der Parameter $\tilde{H}_{1/3}$ ist der Mittelwert der 1/3 höchsten Wellen:

$$\tilde{H}_{1/3} = 4 \sqrt{m_{0\xi}}$$

Er entspricht etwa der 'kennzeichnenden' Wellenhöhe aus Seegangsbeobachtungen:

$$\tilde{H}_{1/3} = H_v$$

Die mittlere Periode $T_m = 2\pi \frac{m_{0\xi}}{m_{1\xi}}$ entspricht etwa der beobachteten Seegangsperiode:

$$T_m = T_v$$

Mit Hilfe der Übertragungsfunktion der linear vom Seegang abhängigen Größe $x(t)$ kann das Spektrum dieser Größe angegeben werden:

$$S_x(\omega, \mu_1) = Y_x^2(\omega, \mu_1) S_{\xi}(\omega, \mu_1)$$

Nach Abb. 10 ist $\mu_1 = 180^\circ - \alpha + \mu$

Um über die Größe x statistische Aussagen machen zu können, werden die Momente des Spektrums S_x benötigt. Bei der Integration über das Spektrum kann das Integral über die Richtung vorgezogen werden:

$$m_{0x} = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \int_0^\infty Y_x^2(\omega, \mu) \frac{2}{\pi} \cos^2 \mu_1 S_{\xi_0}(\omega) d\omega d\mu_1 = \int_0^\infty Y_x^{*2}(\omega) S_{\xi_0}(\omega) d\omega$$

$$m_{2x} = \int_0^\infty \omega_e^2 Y_x^{*2}(\omega) S_{\xi_0}(\omega) d\omega$$

worin:

$$Y_x^{*2}(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} Y_x^2(\omega, \mu_1) \cos^2 \mu_1 d\mu_1$$

eine über dem Winkel gemittelte 'Übertragungsfunktion' ist, wie man sie z.B. aus Messungen auf einem Schiff im natürlichen Seegang erhalten würde.

Normiert man das Seegangsspektrum mit dem Parameter H_v

$$S_{\zeta_0}^*(\omega) = \frac{S_{\zeta_0}(\omega)}{H_v^2}$$

so können auch die Momente des Spektrums der Größe x in normierter Form angegeben werden:

$$m_{0x}^* = \frac{m_{0x}}{H_v^2} \qquad m_{2x}^* = \frac{m_{2x}}{H_v^2}$$

Wie für den Seegang selbst kann für x eine Aussage über den Mittelwert der 1/3 höchsten Maxima gemacht werden ^{*)}:

$$\tilde{x}_{1/3} = 2 \sqrt{m_{0x}^*}$$

Setzen wir diesen Wert mit der halben kennzeichnenden Wellenhöhe ins Verhältnis, so erhalten wir eine über Richtung und Frequenz gemittelte 'Übertragungsfunktion' oder besser: Gewichtsfunktion:

$$\bar{Y}_x = \tilde{x}_{1/3} / \frac{1}{2} \tilde{H}_{1/3} = 4 \sqrt{m_{0x}^*}$$

Abb. 11 und 12 zeigen diese Gewichtsfunktion für die Vertikalbeschleunigung ($x \hat{=} \ddot{z}$) und die Relativbewegung ($x \hat{=} s$) für ein Beispiel (Kat I), aufgetragen über der Seegangsperiode T_v . Für jeden Seegang gekennzeichnet durch die mittlere Laufrichtung zum Schiff ($180^\circ - \alpha$) und durch die mittlere Periode, kann hieraus abgelesen werden, mit welchem Faktor ($\bar{Y}_z, \bar{Y}_s$) die halbe kennzeichnende Wellenhöhe zu multiplizieren ist, damit man die 1/3 höchsten Bewegungsmaxima erhält. Aus den Auftragungen ist zu ersehen, daß Seegänge mit mittleren Perioden zwischen 8 und 10 sec die größten Bewegungen verursachen.

Eine weitere Wahrscheinlichkeitsaussage von Bedeutung ist die Häufigkeit, mit der ein Maximum der Größe x einen gegebenen Grenzwert x_G überschreitet:

$$p_x = e^{-\frac{x_G^2}{2 m_{0x}^* H_v^2}}$$

^{*)} Hierfür muß vorausgesetzt werden, daß die Maxima von x Rayleigh-verteilt sind. Das ist mit ausreichender Genauigkeit möglich.

Eine für die Praxis anschaulichere Größe ist die Anzahl der Fälle pro Zeiteinheit in der dieses Ereignis eintritt:

$$n_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2x}^*}{m_{0x}^*}} p_x$$

Diese mittlere 'Überschreitungsfrequenz' hat darüber hinaus den Vorteil, daß sie einen Absolutwert darstellt und nicht wie der Wert p_x auf die Zahl der Schwingungen pro Zeiteinheit bezogen ist.

Langzeitstatistik

Angaben für die auf der Nordatlantik - Route über viele Jahre auftretenden Seegangshäufigkeiten lassen sich aus Schiffsbeobachtungen (z.B. nach Daten von Walden [6] oder NPL [7]) ermitteln.

Hier wird die Seegangshäufigkeitsverteilung als Produktverteilung dargestellt:

$$p(\alpha, T_v, H_v) = p_\alpha(\alpha) p_v(T_v, H_v)$$

Die Perioden / Höhenverteilung ist nach Walden bestimmt worden (s. Tabelle).

Zur Bestimmung der Richtungsverteilung p_α müssen die Häufigkeitsverteilungen der vom Schiff gesteuerten Kurse γ_0 und der Laufrichtungen der Seegänge μ_v - jeweils bezogen auf die Richtung des Meridians - bekannt sein. Für die Kursverteilung wurde eine plausible Annahme getroffen (s. Abb. 13). Die Richtungsverteilung der Seegänge, wie sie nach [6] ermittelt werden kann, zeigt Abb. 13.

Durch Faltung der beiden gegebenen Verteilungen kann die neue Verteilung der Seegangsrichtungen bezogen auf das Schiff ermittelt werden (s. Abb. 13):

$$\alpha = \mu_v - \gamma_0$$

$$p_\alpha(\alpha) = \int_{-\pi}^{+\pi} p_\gamma(\gamma_0) p_\mu(\alpha + \gamma_0) d\gamma_0$$

Ist auf diese Weise die Seegangshäufigkeitsverteilung gewonnen worden, so kann die Häufigkeit oder die mittlere Frequenz berechnet werden, mit der über viele Jahre die Größe $x(t)$ gegebene Grenzwerte überschreitet:

$$P_X = \int_{-\pi}^{+\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P_{\alpha}(\alpha) P_V(T_V, H_V) P_X(\alpha, T_V, H_V) d\alpha dT_V dH_V$$

$$N_X = \int_{-\pi}^{+\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P_{\alpha}(\alpha) P_V(T_V, H_V) n_X(\alpha, T_V, H_V) d\alpha dT_V dH_V$$

In dieser Betrachtung ist nicht berücksichtigt worden, daß durch Maßnahmen der Schiffsführung besonders ungünstige Seegangsbedingungen gemieden werden. Dies könnte prinzipiell ebenfalls erfaßt werden. Andererseits bietet die hier benutzte Betrachtungsweise die Möglichkeit anzugeben, mit welcher Häufigkeit über viele Jahre die Schiffsführung gezwungen ist, Kurs oder Geschwindigkeit zu ändern.

Vergleich

Zum Vergleich der verschiedenen Entwurfsalternativen sind jeweils die Langzeithäufigkeiten für Vertikalbeschleunigung und Relativbewegung über den gewählten Grenzwerten aufgetragen.

Im wesentlichen bestätigen diese Ergebnisse die für den regelmäßigen Seegang gefundenen Tendenzen: Das Einrumpfschiff liegt bei wesentlich geringeren Häufigkeiten, als alle übrigen Katamaran - Alternativen (Abb. 14 und 15). Im Falle der Vertikalbeschleunigung beträgt der Häufigkeitsunterschied die Größe einer Zehnerpotenz.

Den Einfluß der Breite zeigen die Querkurven für bestimmte Grenzwerte: Vertikalbeschleunigung > Erdbeschleunigung und Relativbewegung > Freibord. Sehr schmale Katamarane mit $b/L < 0.2 \div 0.3$ sind besonders ungünstig. Je größer die Fahrzeugbreite wird, umso günstiger sind die Seegangsbewegungen. Dies gilt insbesondere für die Vertikalbeschleunigung. Mit zunehmendem Rumpfabstand steigt jedoch der Aufwand für die Brückenkonstruktion.

Schlußfolgerungen

Bei See von vorn oder von achtern führt ein Katamaran wegen der schmalen Rümpfe relativ große Bewegungen aus. In schräger See wirkt sich die Verdrängungsaufspaltung günstig aus, allerdings nur bei relativ breiten Fahrzeugen. Das Einrumpfschiff mit gleicher Ladekapazität ist jedoch in allen Fällen überlegen.

Der Grund liegt einmal in der größeren Länge des Einrumpfschiffes mit vergleichbarer Ladekapazität, zum anderen ist die Dämpfung der Tauch- und Stampfbewegung geringer. Hinzu kommt, daß der Anteil der Rollbewegung an der Vertikalbeschleunigung wegen der kleineren Fahrzeugbreite wesentlich geringer ist, zumal wenn das Einrumpfschiff mit einer Schlingerdämpfungsanlage ausgerüstet ist.

In jüngster Zeit ist ein Katamaran - Fahrzeug mit überraschend günstigen Seegangsbewegungen gebaut worden. Es handelt sich um DUPLUS, einem Versorgungsschiff für die Bohrinseln vor der Niederländischen Küste. Die von N.S.M.B. ausgeführten Messungen am Modell und an der Großausführung [8] zeigen sehr geringe Werte für Tauchen und Stampfen (s. Abb. 17). Dieses günstige Verhalten ist auf die unkonventionelle Rumpfform zurückzuführen. Die Verdrängung ist sehr tief, im wesentlichen in zwei torpedoartigen Rümpfen untergebracht. Dadurch kann die Wasserlinie sehr schmal gehalten werden, wodurch die Seegangskräfte verringert werden. Die geringe Dämpfung der Vertikalbewegung schmaler Rümpfe wird bei DUPLUS durch tragflächenartige Streben zwischen den Rümpfen wieder wettgemacht. Auf dem hier eingeschlagenen Weg scheinen also durchaus Möglichkeiten zu liegen, das Seegangsverhalten von Wasserfahrzeugen entscheidend zu verbessern.

Literatur

- [1] Eggers, K.: Über Widerstandsverhältnisse von Zweikörperschiffen.
Jahrb. STG, 1955
- [2] Vollheim, R.: Über Formgebung und Widerstand von Katamaranen.
Schiffbauforschung Nr.7, 1968
- [3] Corlett, E.C.B.: Twin Hull Ships
Royal Inst. of Nav. Arch., Vol.111, No.4, 1969
- [4] Kirsch, M.: Die Berechnung der Bewegungsgrößen der gekoppelten Tauch- und Stampfbewegung nach der erweiterten Streifentheorie von Grim.
Inst. f. Schiffbau, Hamburg, Bericht Nr. 241
- [5] Marks, W., Goodman, T.R., Pierson, W.J., Tick, L.J., Vassilopoulos, L.A.: An Automated System for Optimum Ship Routing.
Trans. SNAME, Vol.76, 1968
- [6] Hogben, N., Lumb, F.E.: Ocean Wave Statistics.
National Physikal Laboratory, London, 1967
- [7] Walden, H.: Die Eigenschaften der Meereswellen im Nordatlantischen Ozean.
Deutsches Seewetteramt, Einzelveröff. Nr.41, 1964
- [8] van Sluijs, M.F.: Model and Full Scale Motions of a Twin-Hull Vessel.
Nederl. Scheepsstudiecentr. TNO Report Nr.131S, 1969

Bildunterschriften

- Abb. 1 Hauptabmessungen und Skizze der Katamaran - Varianten und des vergleichbaren Einrumpfschiffes
- Abb. 2 Definitionsskizze
- Abb. 3 Übertragungsfunktion für Tauchen (Kat I)
- Abb. 4 Übertragungsfunktion für Stampfen (Kat I)
- Abb. 5 Übertragungsfunktion für Rollen (Kat I)
- Abb. 6 Übertragungsfunktion für Vertikalbeschleunigung am Punkt x_L, y_L (Kat I)
- Abb. 7 Übertragungsfunktion für Relativbewegung am Punkt x_L, y_L (Kat I)
- Abb. 8 Vergleich der Tauchbewegungen des Einrumpfschiffes und des Katamarans (bzw. des Katamaran - Einzelrumpfes)
- Abb. 9 Vergleich der Stampfbewegungen des Einrumpfschiffes und des Katamarans (bzw. des Katamaran - Einzelrumpfes)
- Abb.10 Definition der Richtungswinkel
- Abb.11 Vergleich der gemittelten Gewichtsfunktionen der Vertikalbeschleunigung im kurzkämmigen Seegang
- Abb.12 Vergleich der gemittelten Gewichtsfunktionen der Relativbewegung im kurzkämmigen Seegang
- Tabelle
- Abb.13 Häufigkeitsverteilung der Kursrichtungen, der Seegangslaufrichtungen und der Seegangsrichtungen bezogen auf das Schiff
- Abb.14 Vergleich der Langzeithäufigkeiten für Vertikalbeschleunigung
- Abb.15 Vergleich der Langzeithäufigkeiten für Relativbewegung
- Abb.16 Abhängigkeit der Langzeithäufigkeiten vom Breitenverhältnis der Katamarane
- Abb.17 Übertragungsfunktionen der Tauch- und Stampfbewegung des Versorgungsschiffes DUPLUS

Symbolverzeichnis

z	Vertikalbewegung an beliebiger Stelle des Fahrzeugs
z_0	Vertikalbewegung des Punktes 0 (+ Tauchbewegung n. oben)
θ	Stampfwinkel (+ Bug nach oben)
φ	Rollwinkel (+S.B. nach oben)
s	Relativbewegung zwischen Schiff und Wasser
ω	Seegangsfrequenz
k	Wellenzahl
ξ	Wellenerhebung
γ_x	Übertragungsfunktion einer linear von der Seegangserhebung abhängigen Größe x
ω_e	Begegnungsfrequenz
μ	Laufrichtung der regelmäßigen Wellen bezogen auf das Schiff
μ_1	Laufrichtung einer regelmäßigen Wellenkomponente bezogen auf die mittlere Laufrichtung des kurzkämmigen Seeganges
α	mittlere Laufrichtung des kurzkämmigen Seeganges bezogen auf das Schiff
γ_0	Kursrichtung des Schiffes bezogen auf die Nordrichtung
μ_v	Mittlere beobachtete Laufrichtung des kurzkämmigen Seeganges bezogen auf die Nordrichtung
H_v	beobachtete Wellenhöhe
T_v	beobachtete Periode
} des unregelmäßigen Seeganges	
γ_x^*	über alle im kurzkämmigen Seegang vorkommenden Laufrichtungen gemittelte 'Übertragungsfunktion'
$\bar{\gamma}_x$	über alle Laufrichtungen und Frequenzen des kurzkämmigen Seeganges gemittelte 'Übertragungsfunktion' besser: 'Gewichtsfunktion'
S_ξ	Seegangsspektrum
S_x	Spektrum der Größe x

m_0, m_1, m_2 Momente der Spektren

p_x Kurzzeit - Überschreitungshäufigkeit

n_x " - Überschreitungsfrequenz

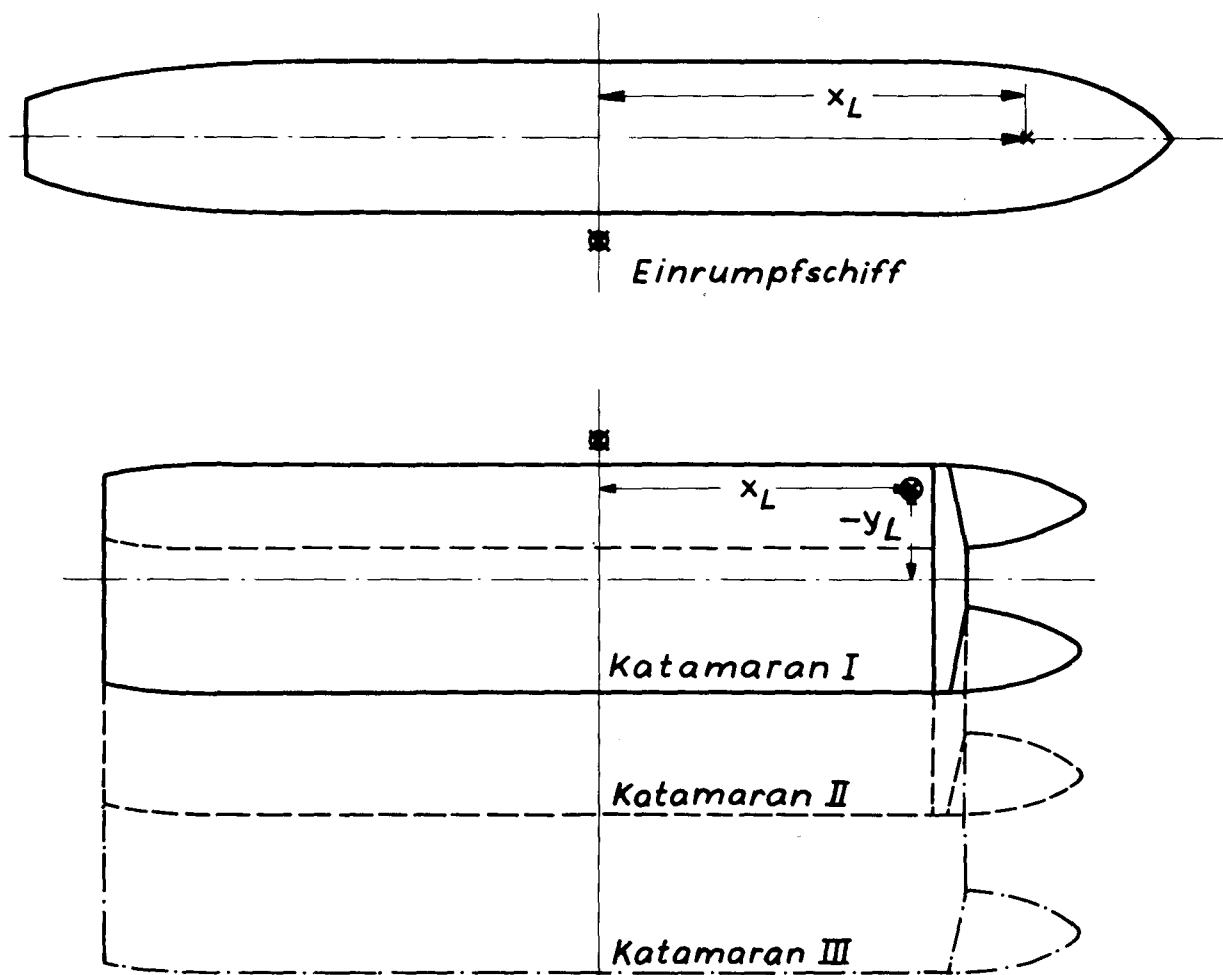
P_x Langzeit - Überschreitungshäufigkeit

N_x " - Überschreitungsfrequenz

für die Maxima
der Größe x

Bildunterschriften

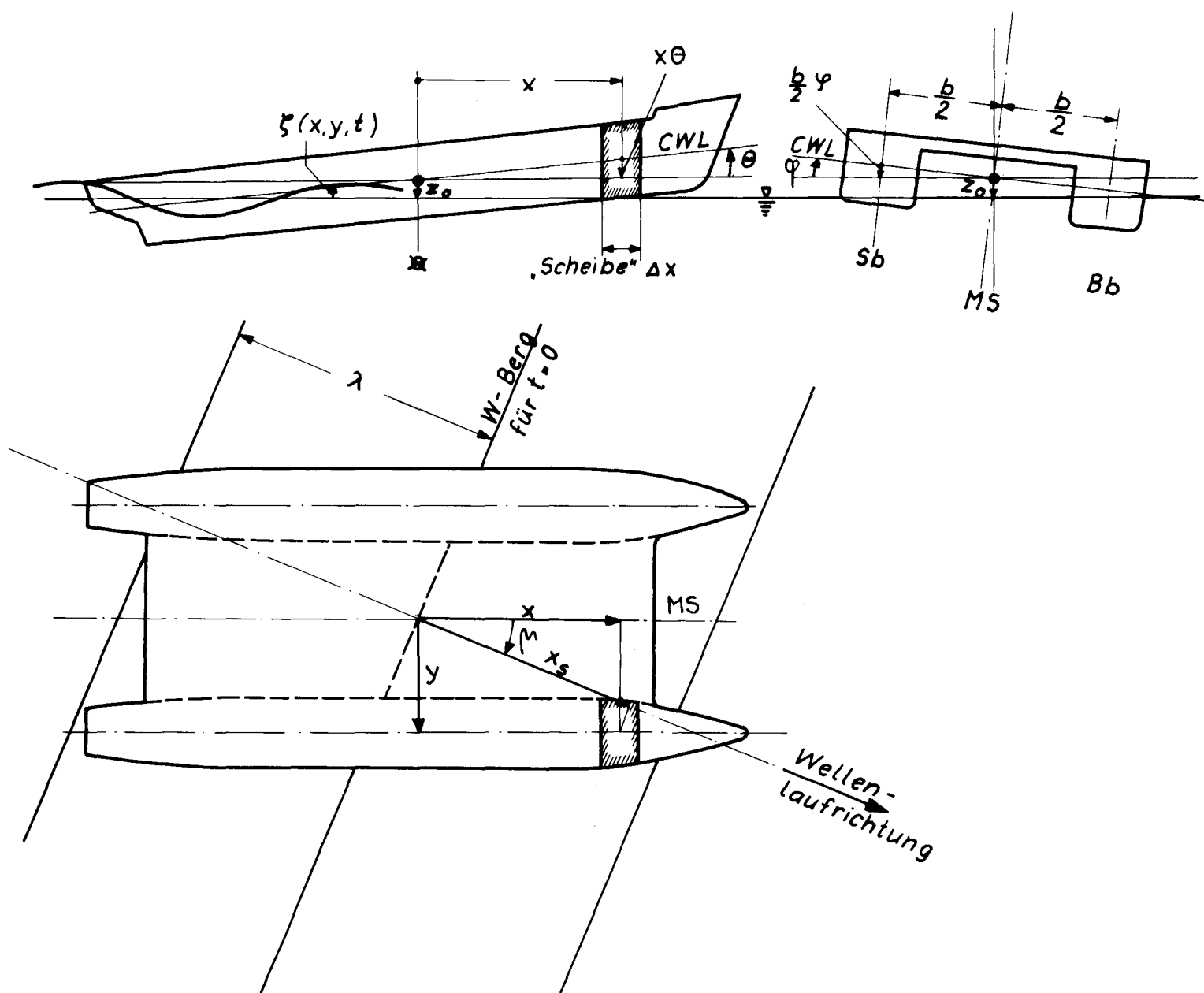
- Abb. 1 Hauptabmessungen und Skizze der Katamaran - Varianten und des vergleichbaren Einrumpfschiffes
- Abb. 2 Definitionsskizze
- Abb. 3 Übertragungsfunktion für Tauchen (Kat I)
- Abb. 4 Übertragungsfunktion für Stampfen (Kat I)
- Abb. 5 Übertragungsfunktion für Rollen (Kat.I)
- Abb. 6 Übertragungsfunktion für Vertikalbeschleunigung am Punkt x_L, y_L (Kat I)
- Abb. 7 Übertragungsfunktion für Relativbewegung am Punkt x_L, y_L (Kat I)
- Abb. 8 Vergleich der Tauchbewegungen des Einrumpfschiffes und des Katamarans (bzw. des Katamaran - Einzelrumpfes)
- Abb. 9 Vergleich der Stampfbewegungen des Einrumpfschiffes und des Katamarans (bzw. des Katamaran - Einzelrumpfes)
- Abb.10 Definition der Richtungswinkel
- Abb.11 Vergleich der gemittelten Gewichtsfunktionen der Vertikalbeschleunigung im kurzkämmigen Seegang
- Abb.12 Vergleich der gemittelten Gewichtsfunktionen der Relativbewegung im kurzkämmigen Seegang
- Tabelle
- Abb.13 Häufigkeitsverteilung der Kursrichtungen, der Seegangslaufrichtungen und der Seegangsrichtungen bezogen auf das Schiff
- Abb.14 Vergleich der Langzeithäufigkeiten für Vertikalbeschleunigung
- Abb.15 Vergleich der Langzeithäufigkeiten für Relativbewegung
- Abb.16 Abhängigkeit der Langzeithäufigkeiten vom Breitenverhältnis der Katamarane
- Abb.17 Übertragungsfunktionen der Tauch- und Stampfbewegung des Versorgungsschiffes DUPLUS



Hauptabmessungen und Skizze der Katamaran-Varianten und des vergleichbaren Einrumpfschiffes.

		Kat I	Kat II	Kat III	Einrumpf- schiff
Länge	L _{pp} m	183	183	183	216
Hauptspantbreite	B m	16,8	16,8	16,8	30,5
Tiefgang	T m	9,46	9,46	9,46	9,15
Abstand der Rumpfmitten	b m	29,0	53,3	84,0	—
	b/L _{pp} —	0,16	0,29	0,46	—
Gesamtbreite	B _{ges} m	45,8	70,1	100,8	—
Verdrängung	V m ³	ca. 36 000	ca. 36 000	ca. 36 000	ca. 36 000
Völligkeit	c _B —	0,62	0,62	0,62	0,61
	B/T —	1,8	1,8	1,8	3,3
kritischer Punkt	x _L m	61,5	61,5	61,5	83,5
	y _L m	-18,5	-30,6	-46,0	0
Geschwindigkeit	v kn	22	22	22	22
	F _N —	0,267	0,267	0,267	0,245

Tabelle zu Abb.1



Definitionsskizze

Abb. 3

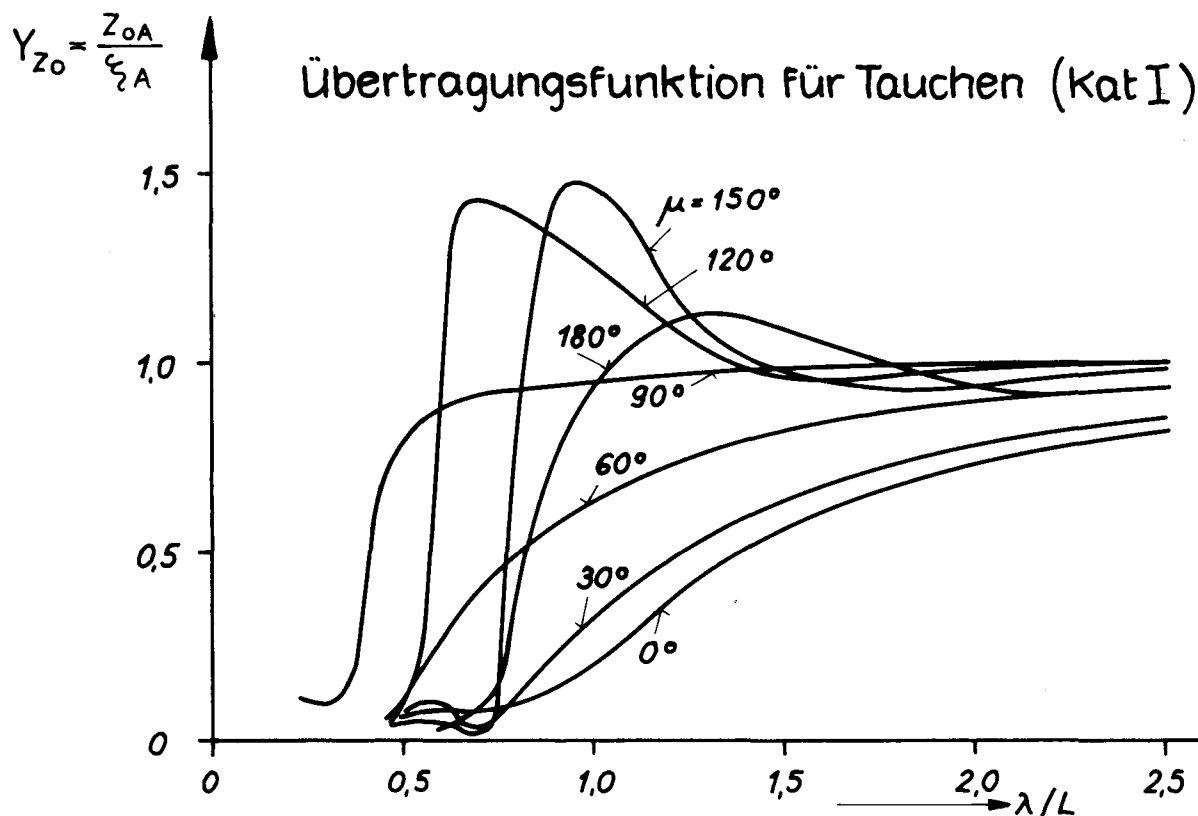
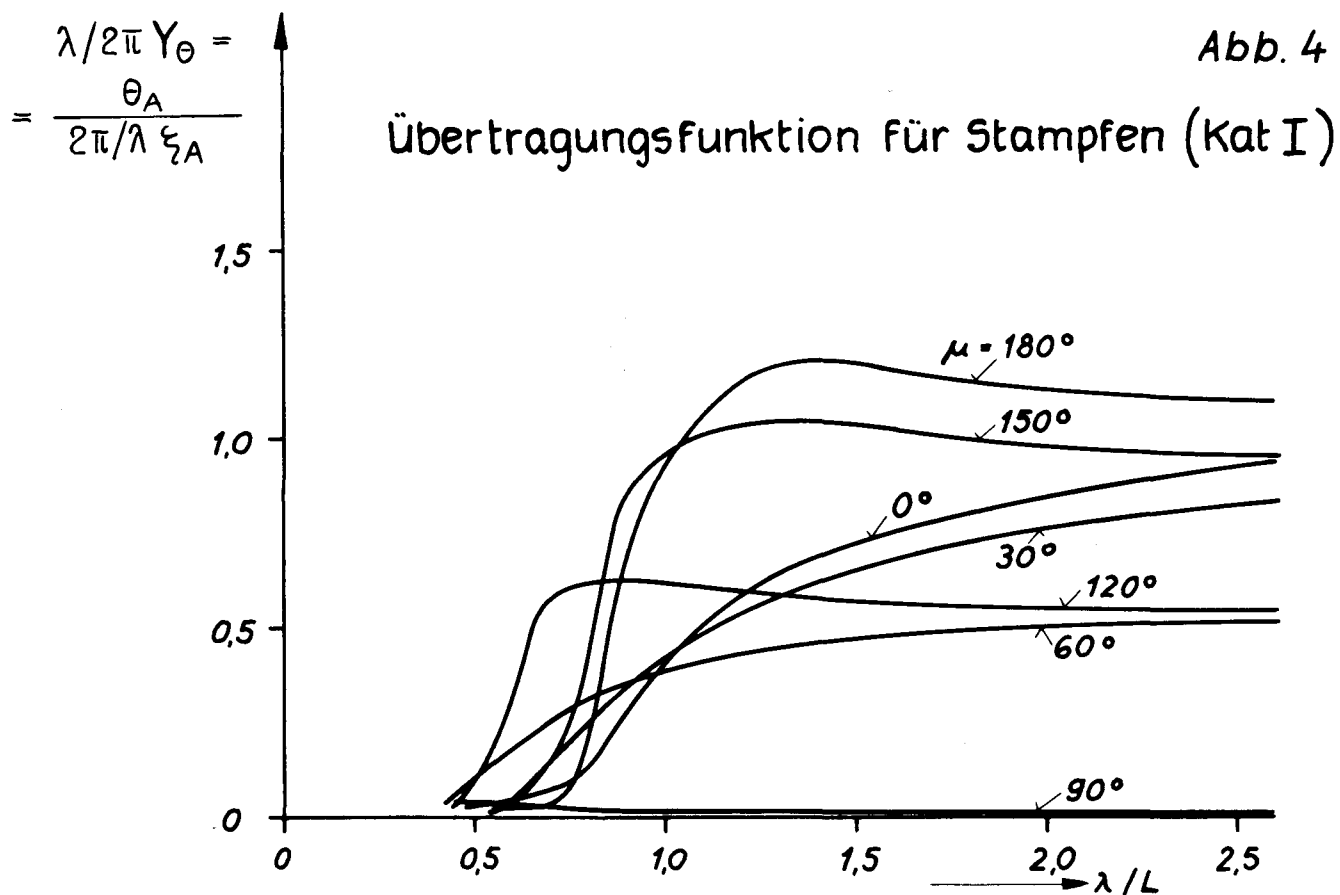


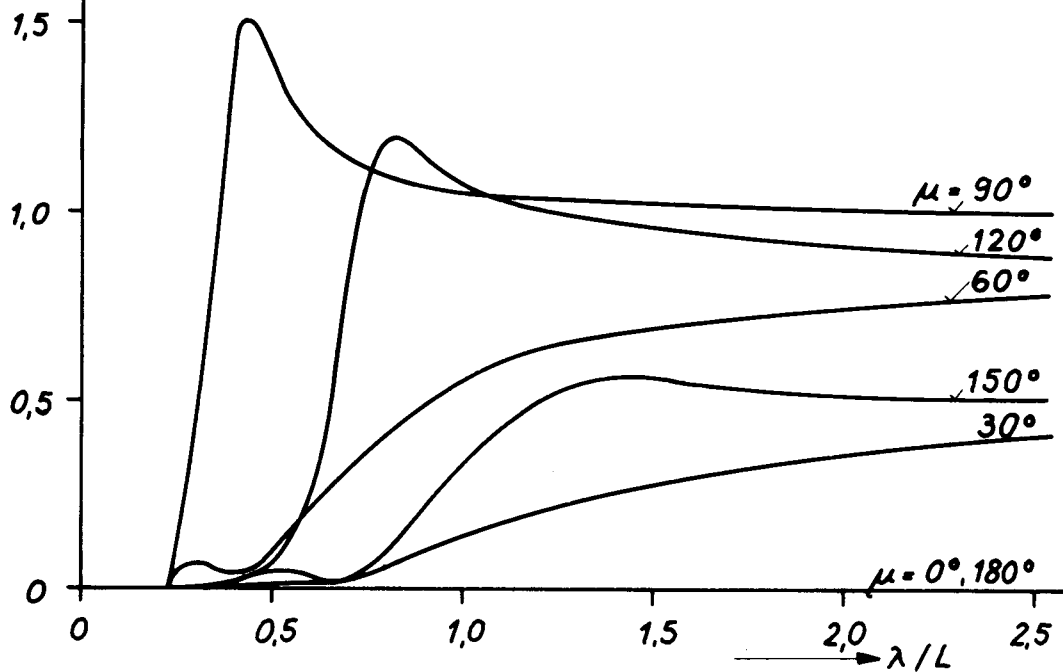
Abb. 4



$$\frac{\lambda}{2\pi} Y_{\varphi} = \frac{\varphi_A}{2\pi/\lambda \xi_A}$$

Abb.5

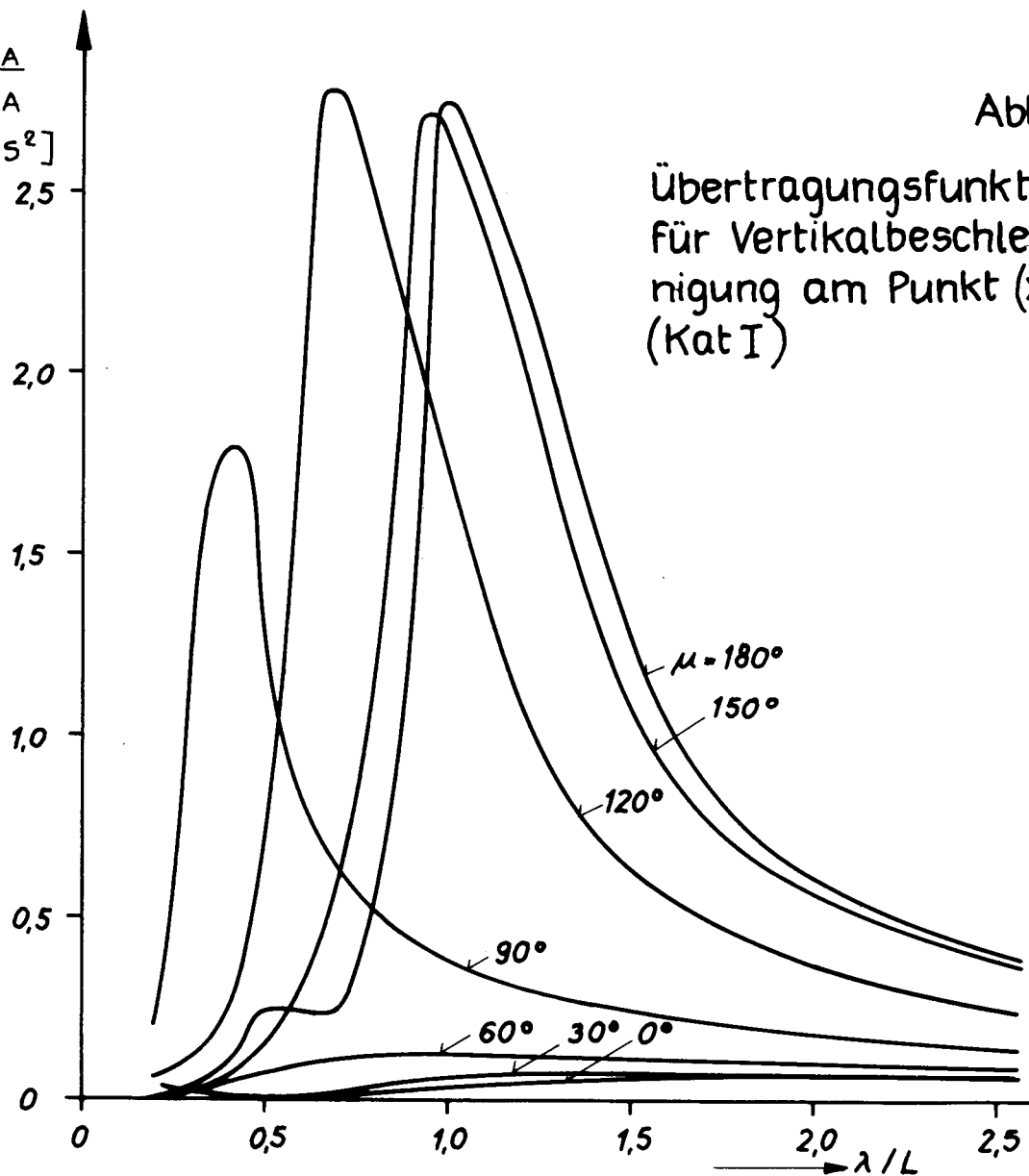
Übertragungsfunktion für Rollen (Kat I)

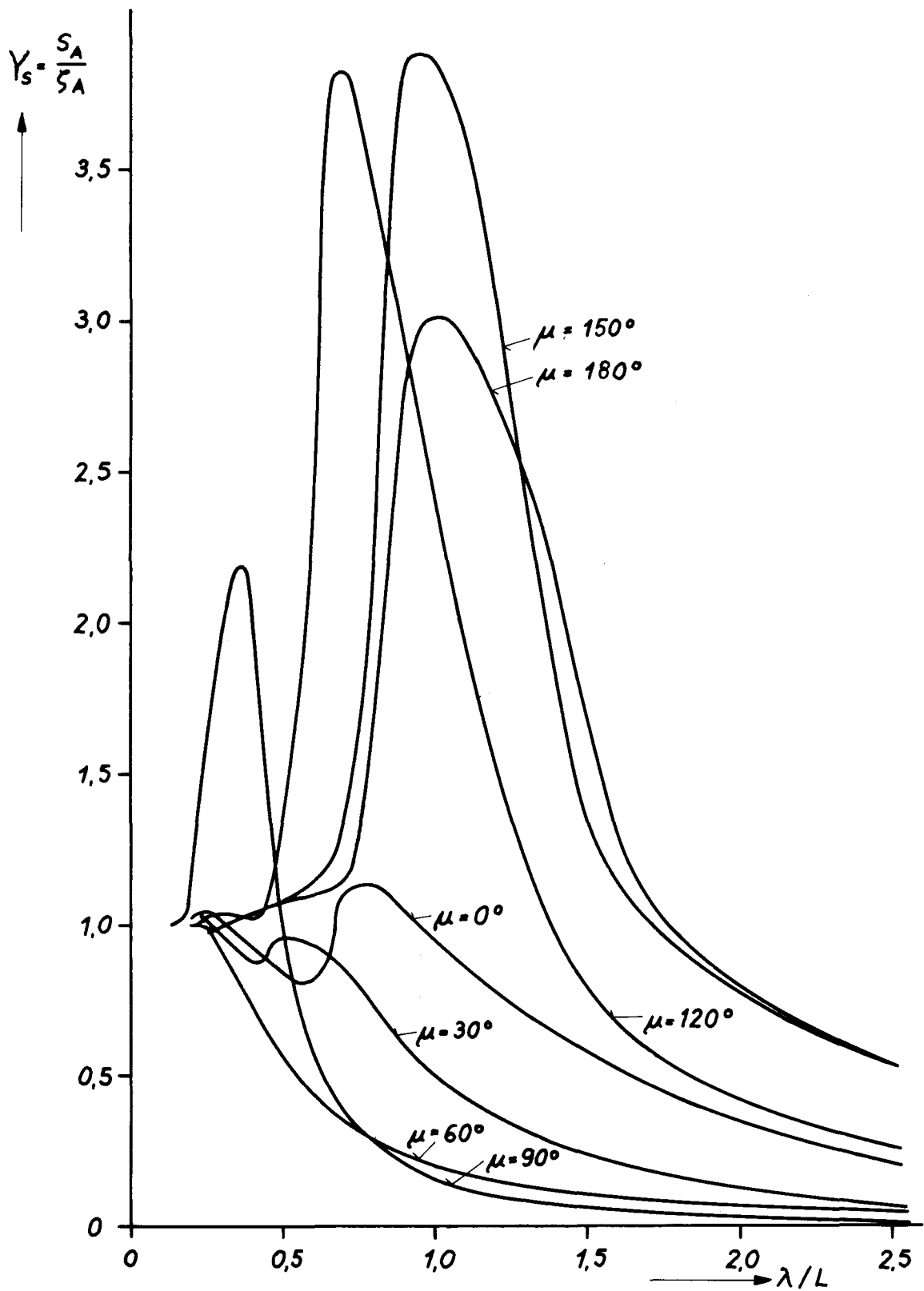


$$Y_{\ddot{z}} = \frac{\ddot{z}_A}{\xi_A} \quad [1/s^2]$$

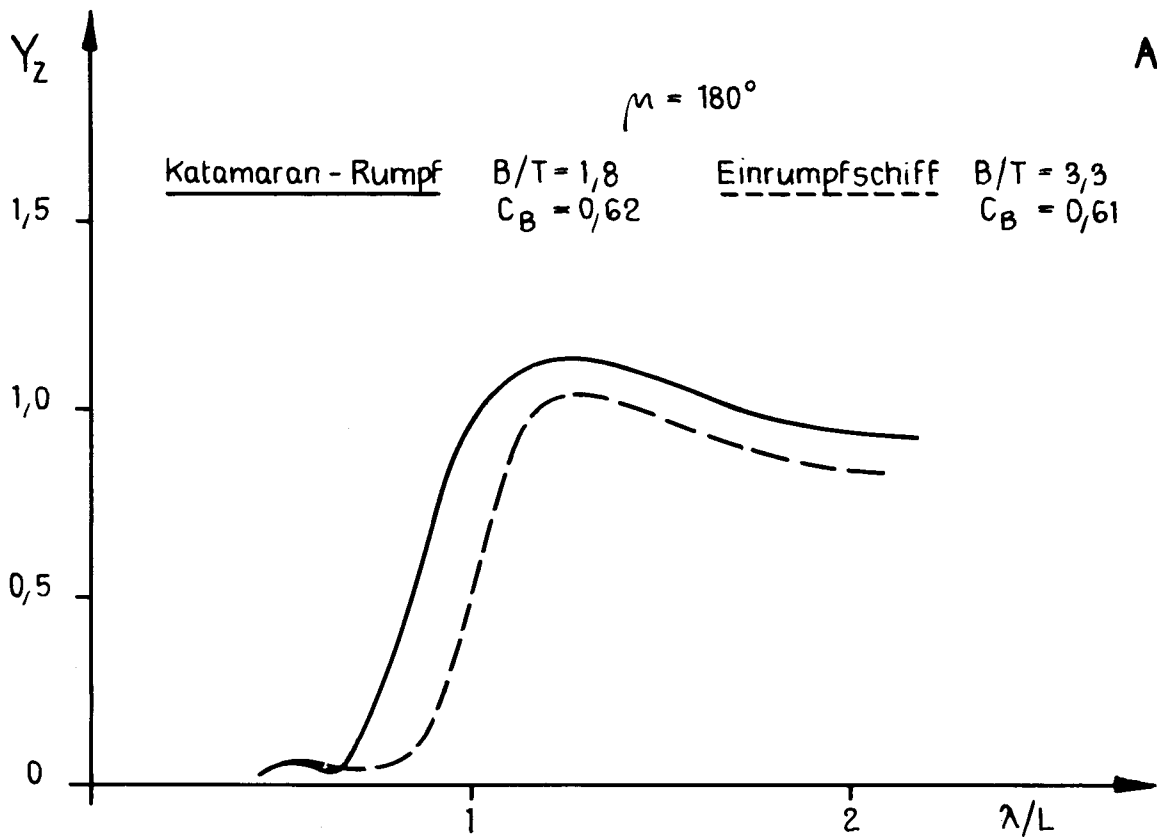
Abb.6

Übertragungsfunktion für Vertikalbeschleunigung am Punkt (x_L, y_L) (Kat I)

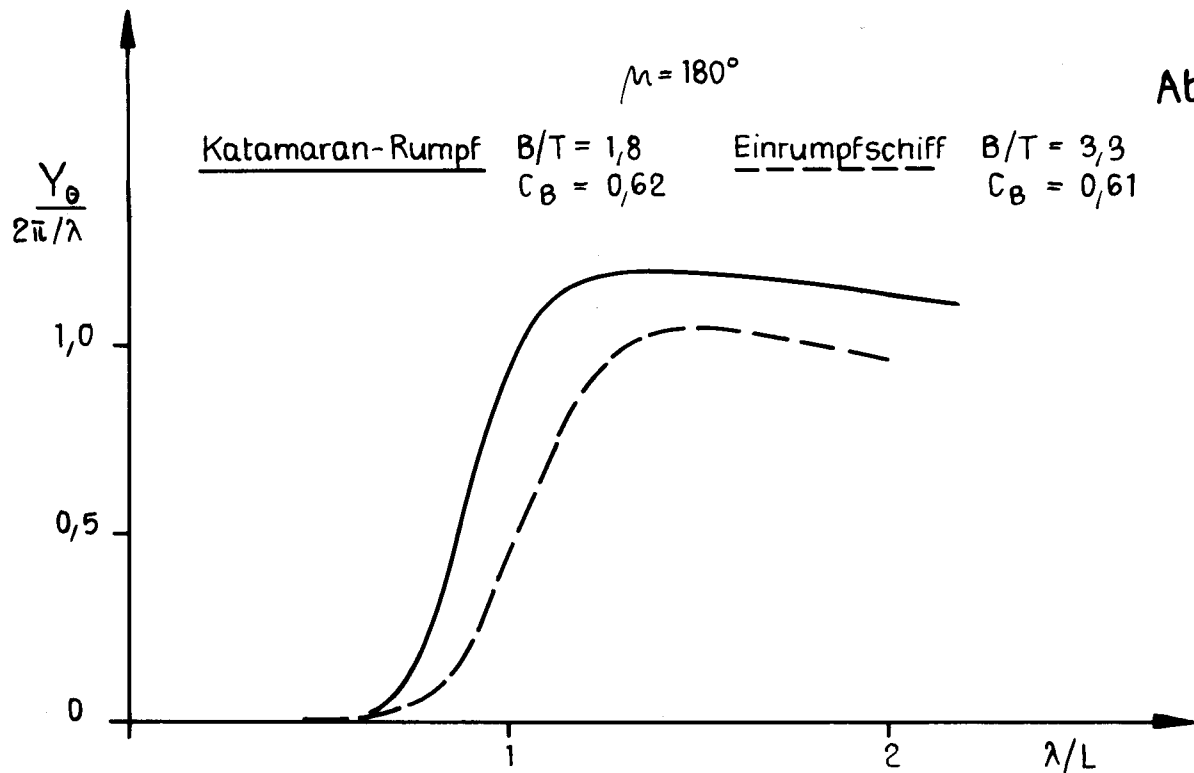




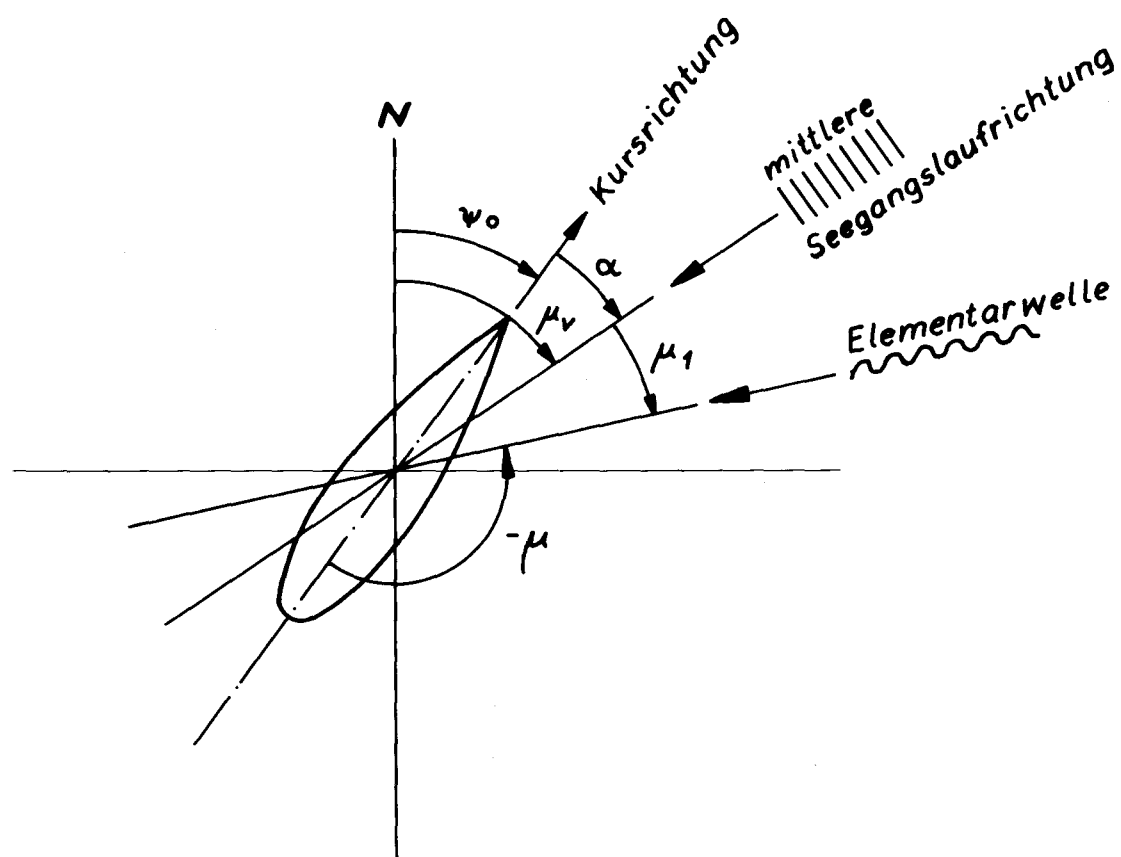
Übertragungsfunktion für Relativbewegung
am Punkt (x_L, y_L) (Kat I)



Vergleich der Tauchbewegungen des Einrumpfschiffes und des Katamarans (bzw. Katamaran-Einzelrumpfes)

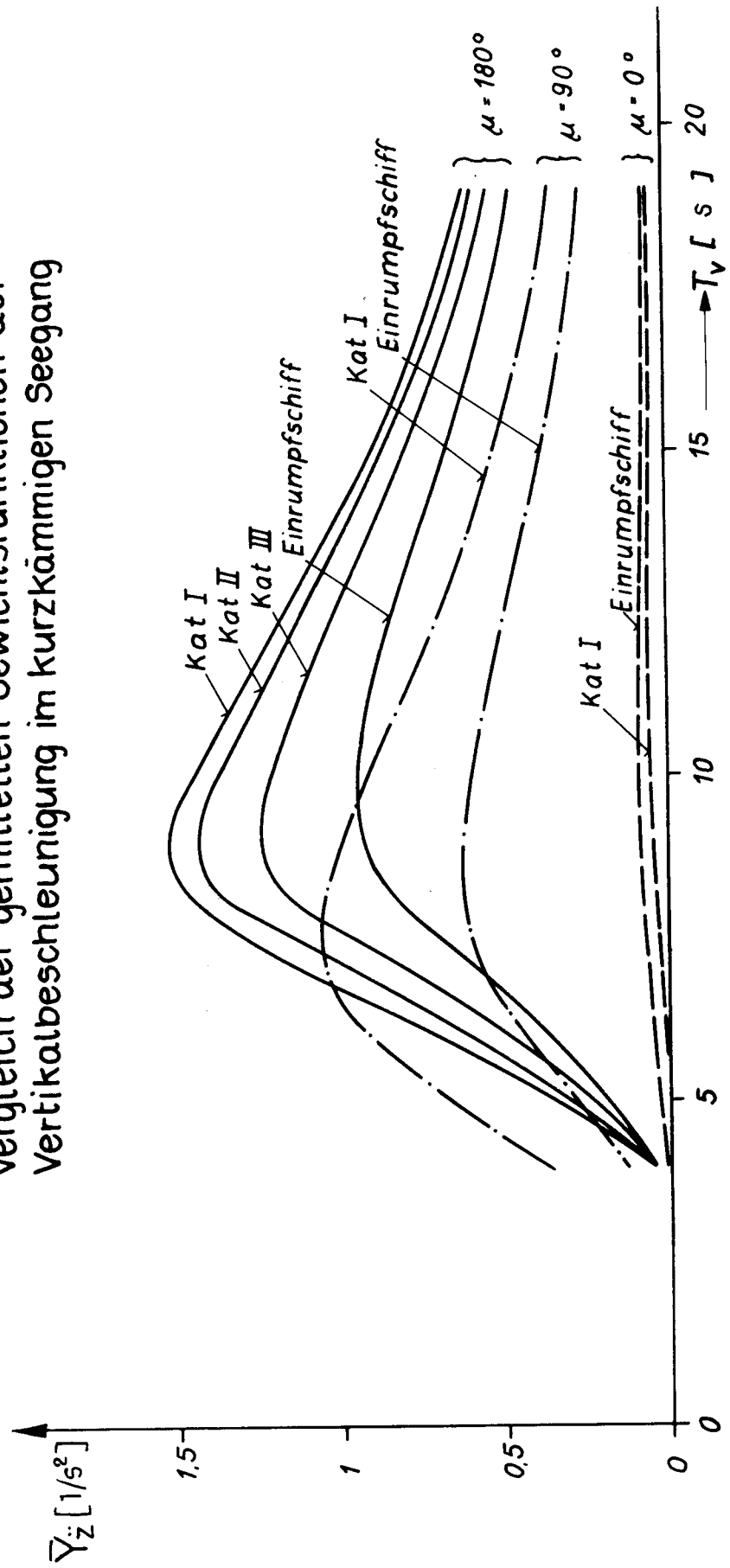


Vergleich der Stampfbewegungen des Einrumpfschiffes und des Katamarans (bzw. Katamaran-Einzelrumpfes)

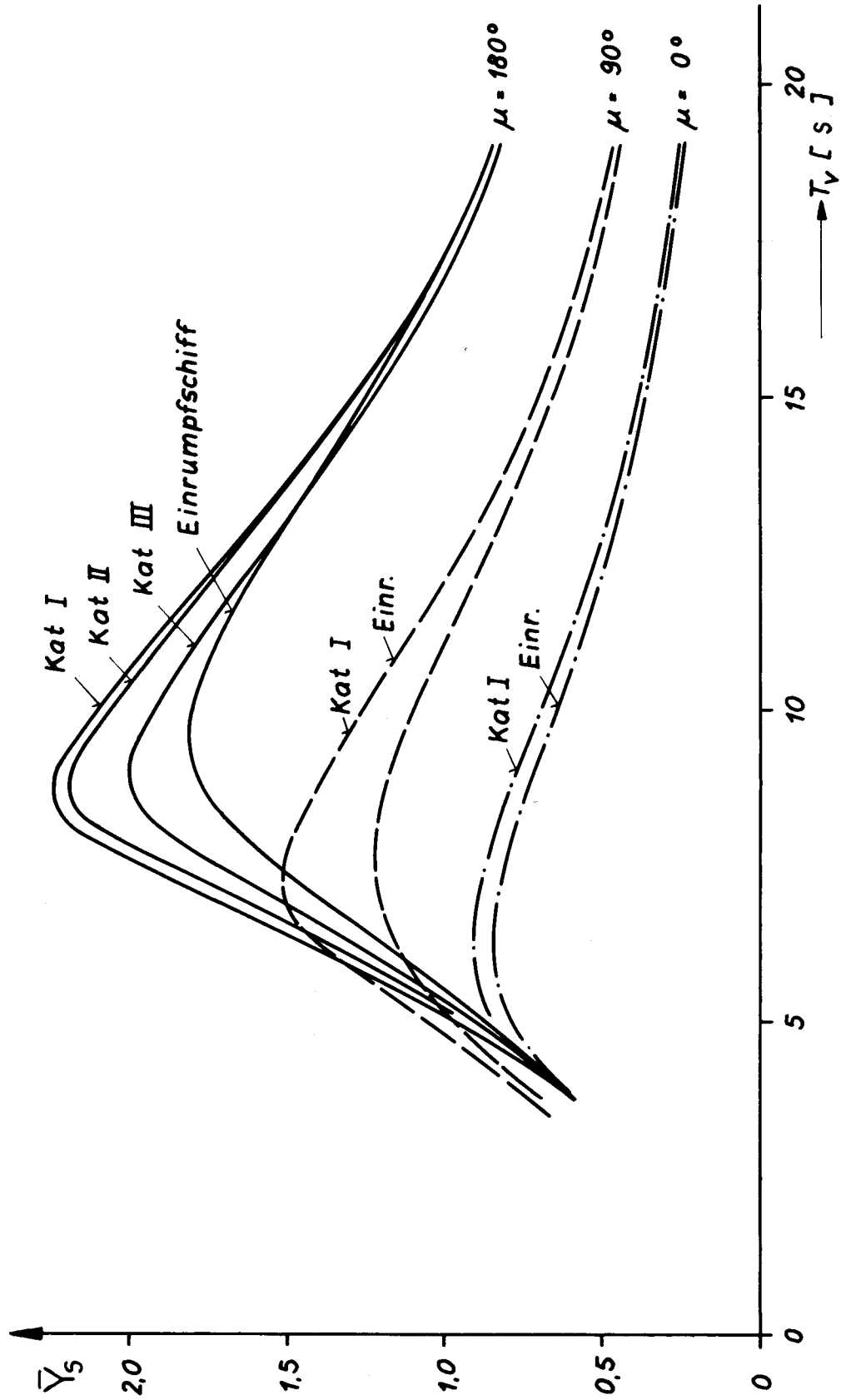


Definition der Richtungswinkel

Vergleich der gemittelten Gewichtsfunktionen der Vertikalbeschleunigung im kurzkämmigen Seegang



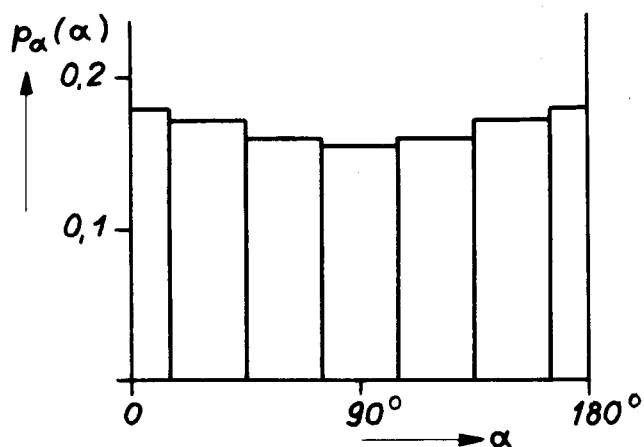
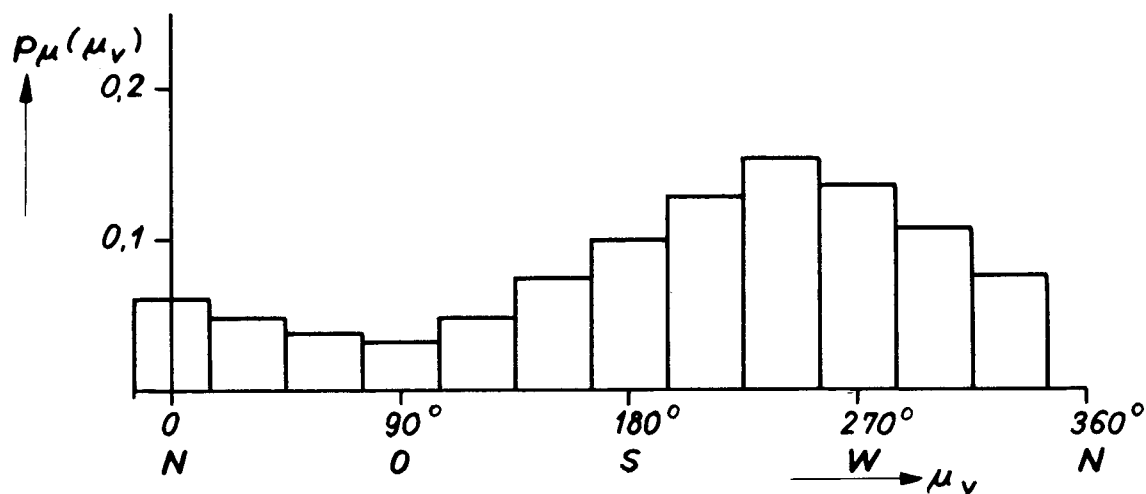
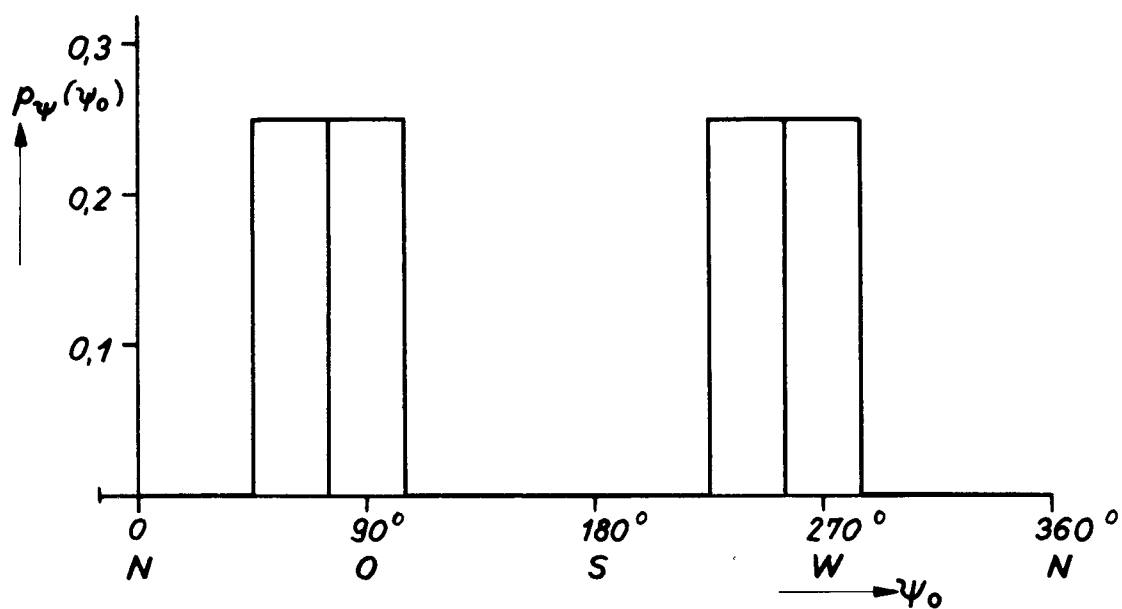
Vergleich der gemittelten Gewichtsfunktionen der
Relativbewegung im kurzkämmigen Seegang



$\frac{H_v[m]}{T_v[^\circ C]}$	< 5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	> 17	ΣT_v
0 - 1,25	25,41	16,22	8,12	4,64	1,26	0,60		0,23	56,48
1,25 - 2,25	105,44	136,62	67,28	29,58	6,51	1,05	0,64	0,02	347,16
2,25 - 3,25	28,88	131,79	87,00	34,66	7,14	1,40	0,42	0,16	291,45
3,25 - 4,25	4,08	41,40	65,25	27,55	6,30	1,08	0,32	0,08	146,06
4,25 - 5,25	0,79	12,77	34,80	19,58	5,46	0,97	0,27	0,04	74,68
5,25 - 6,25	0,40	3,97	15,37	12,04	4,20	0,92	0,21	0,03	37,16
6,25 - 7,25		1,38	6,38	7,11	3,36	0,86	0,17	0,02	19,28
7,25 - 8,25		0,52	3,05	4,21	2,44	0,80	0,12	0,01	11,15
8,25 - 9,25		0,33	1,39	2,61	1,97	0,65	0,09	0,01	7,05
9,25 - 10,25			0,73	1,45	1,26	0,55	0,07		4,06
10,25 - 11,25			0,35	0,74	0,84	0,46	0,05		2,44
11,25 - 12,25			0,15	0,41	0,55	0,31	0,03		1,45
12,25 - 13,25			0,19	0,20	0,29	0,17	0,01		0,80
13,25 - 14,25				0,12	0,19	0,12			0,43
14,25 - 15,25				0,05	0,10	0,04			0,19
15,25 - 16,25				0,03	0,08				0,11
16,25 - 17,25				0,01	0,04				0,05
> 17,25				0,01	0,01				0,02
ΣH_v	165,00	345,00	290,00	145,00	42,00	10,00	2,40	0,60	1000,00

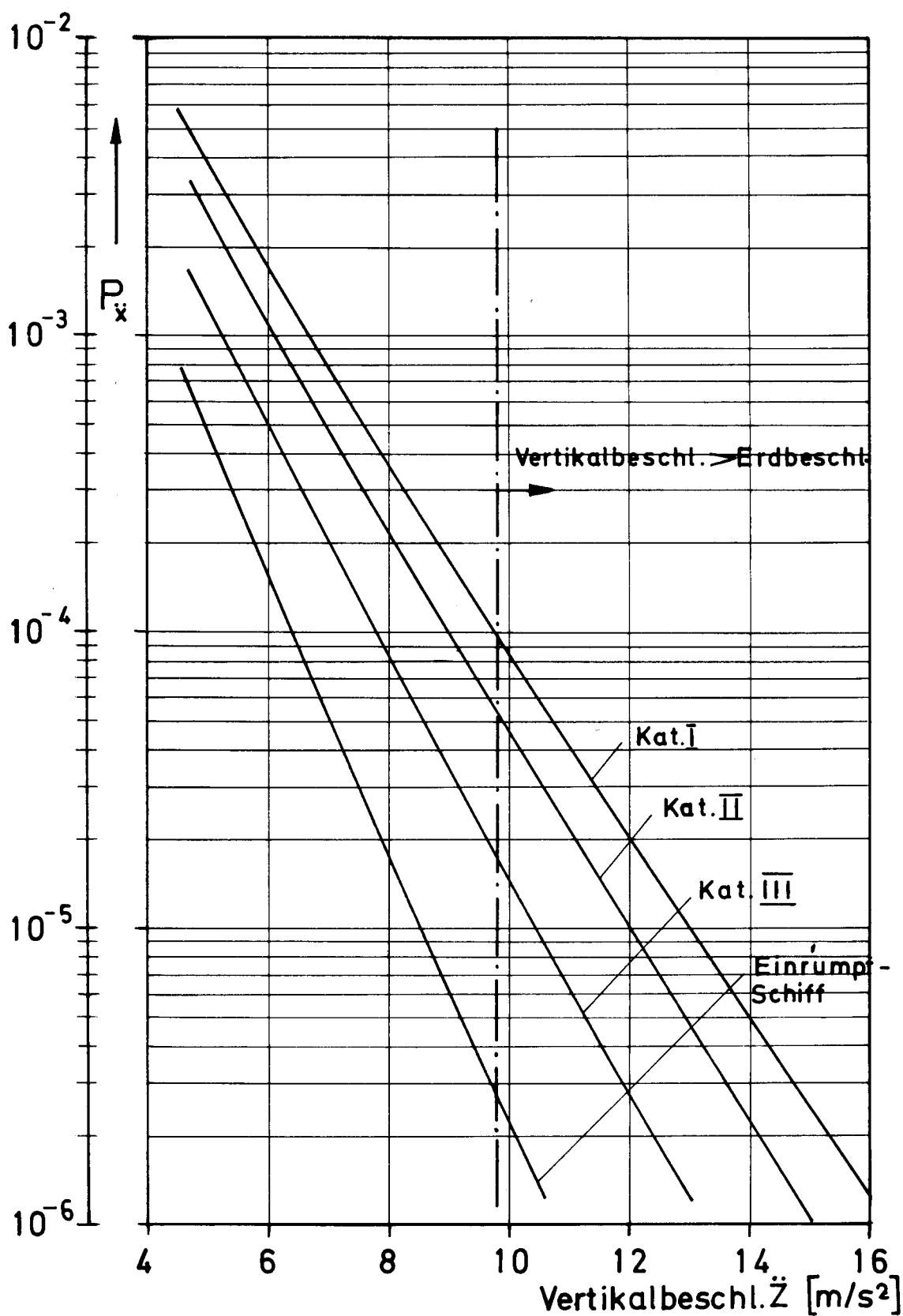
Tabelle für die Seegangshäufigkeit $p_v(H_v, T_v)$ in ‰ auf der Nordatlantikroute (geglättete Werte für die Witterschiffe K, D und E nach Walden [7])

Abb.13

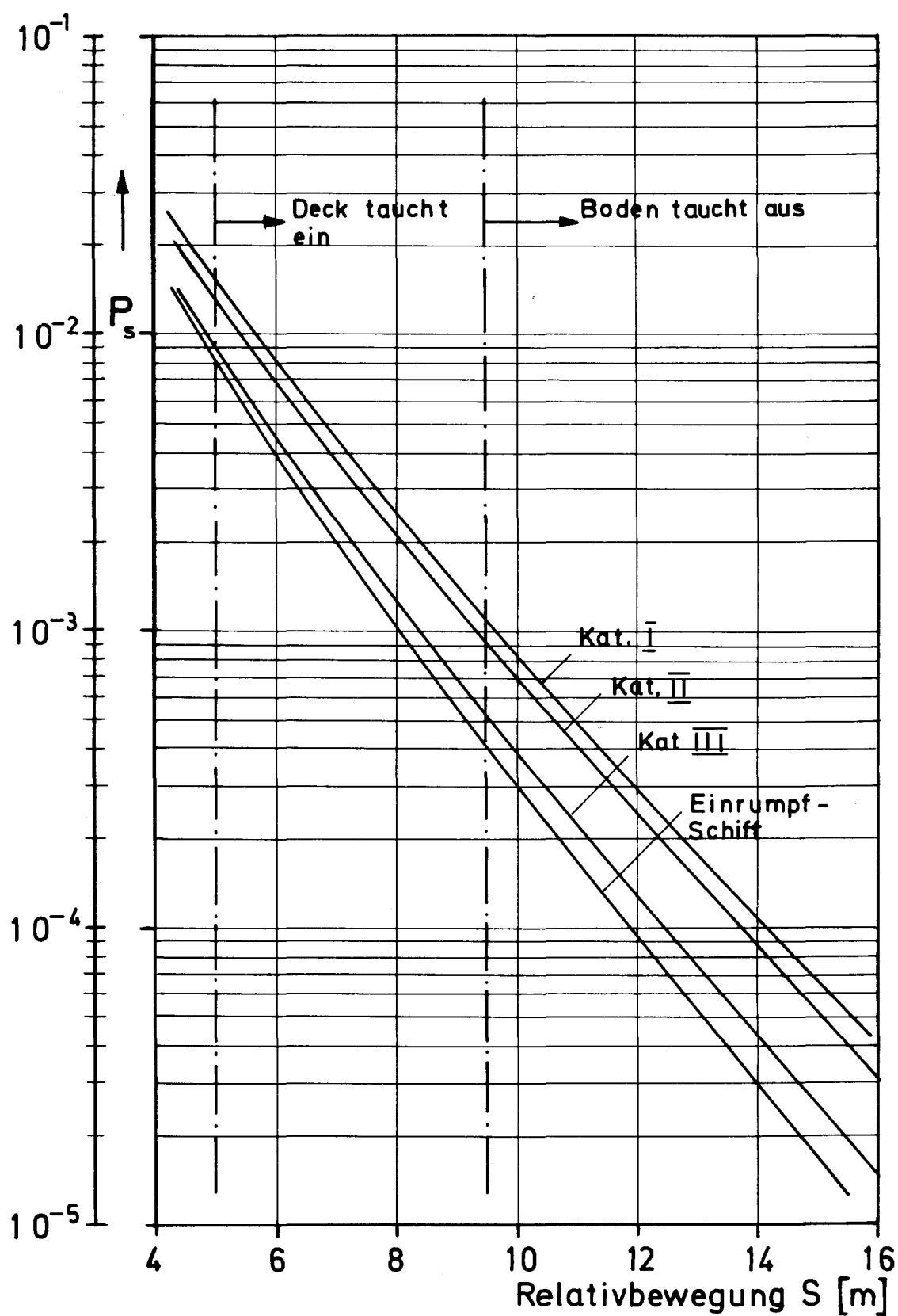


Häufigkeitsverteilung der Kursrichtungen, der Seegangslaufrichtungen und der Seegangsrichtungen bezogen auf das Schiff

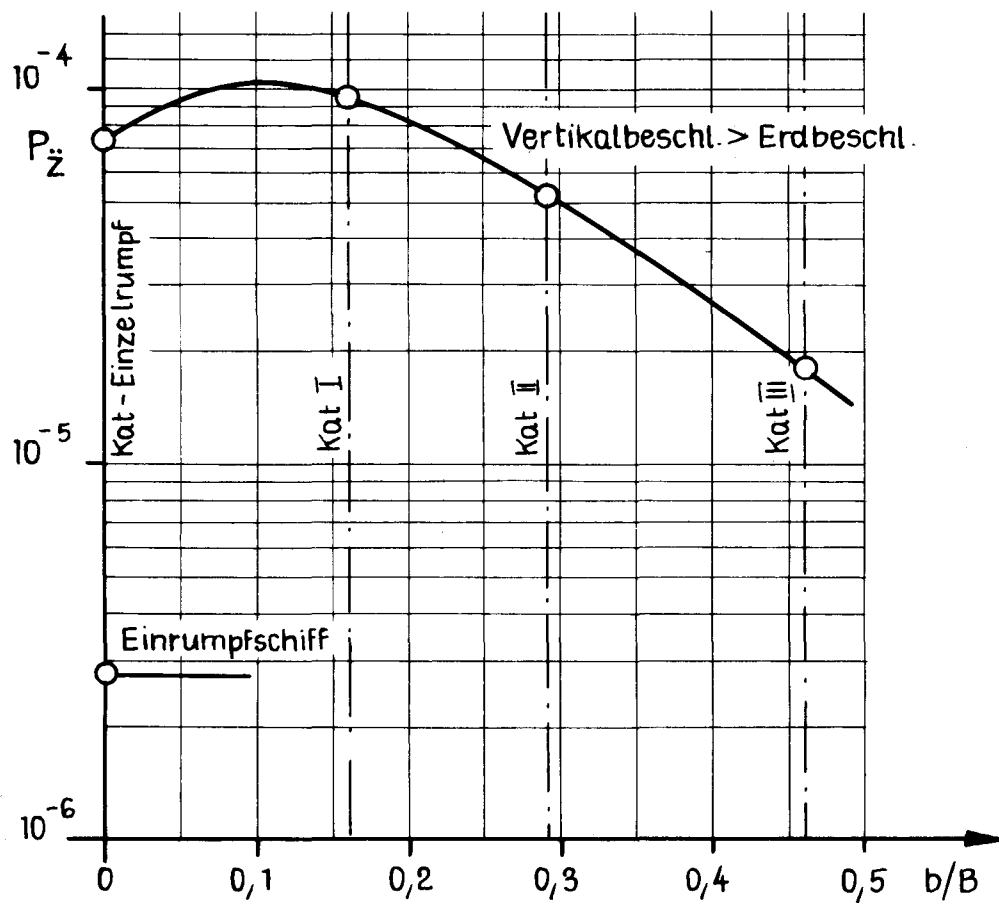
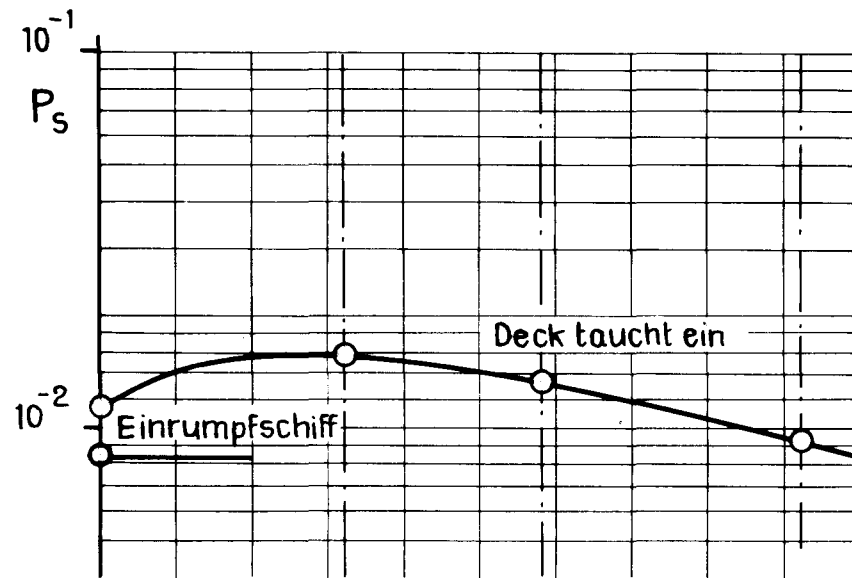
Vergleich der Langzeithäufigkeiten für Vertikalbeschleunigung



Vergleich der Langzeithäufigkeit für Relativbewegung



Abhängigkeit der Langzeithäufigkeiten vom Breitenverhältnis der Katamarane



Übertragungsfunktionen der Tauch- und Stampfbewegung des Versorgungsschiffes DUPLUS

