

473 | Februar 1987

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Peter Kröger

# Simulation der Rollbewegung von Schiffen im Seegang

**TUHH**

Technische Universität Hamburg-Harburg

## **Simulation der Rollbewegung von Schiffen im Seegang**

P. Kröger, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1987

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

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

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 473

# Simulation der Rollbewegung von Schiffen im Seegang

Hans-Peter Kröger

Februar 1987

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Bestehende Verfahren zur Berechnung von Rollbewegungen</b>	<b>7</b>
4.1	Verfahren von Grim . . . . .	7
4.2	Verfahren von Krappinger . . . . .	8
4.3	Verfahren von Abicht . . . . .	9
4.4	Verfahren von Söding . . . . .	12
4.5	Verfahren von Söding, Böttcher und Petey . . . . .	13
4.6	Verfahren von Paulling . . . . .	14
4.7	Verfahren von Hattendorf und Blume . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Eigene Simulationsmethode</b>	<b>22</b>
5.1	Zielsetzung . . . . .	22
5.2	Koordinatensysteme . . . . .	22
5.2.1	Schiffsfestes Koordinatensystem . . . . .	22
5.2.2	Raumfestes Koordinatensystem . . . . .	23
5.3	Lösungsmethode . . . . .	23
5.4	Darstellung des unregelmäßigen Seeganges durch regelmäßige Seegangskomponenten . . . . .	25
5.5	Äquivalente Welle . . . . .	28
5.6	Bewegungsgleichungen . . . . .	32
5.7	Bestimmung der Dämpfungskonstanten . . . . .	34
5.7.1	Lineare Dämpfungskonstante $d_L$ . . . . .	34
5.7.2	Quadratische Rolldämpfungskonstante $d_Q$ . . . . .	35
5.8	Äußeres Moment . . . . .	38
5.9	Bestimmung der Hebelarme . . . . .	39
5.10	Längsbewegung . . . . .	41
5.11	Bestimmung der Beschleunigung parallel zu den Decks . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Rechenergebnisse</b>	<b>45</b>
<b>A</b>	<b>Anhang A</b>	<b>52</b>
<b>B</b>	<b>Anhang B</b>	<b>84</b>

**Abbildungsverzeichnis**

1	Koordinatensysteme . . . . .	22
2	Methodik zur Simulation kontinuierlicher stochastischer Prozesse . . . . .	24
3	Koeffizient der wirksamen Rolldämpfung . . . . .	35
4	Verhältnis $\varphi_{stat}/\varphi_{res}(\varphi_{res} = 20^\circ)$ . . . . .	36
5	Widerstandsbeiwert $c_D$ nach [31] . . . . .	37
6	Faktor für die Erhöhung der Umströmungsgeschwindigkeit . . . . .	37
7	E.L.M.A. Tres . . . . .	46

## 1 Kurzfassung

Es wird ein Verfahren zur Simulation von Schiffsbewegungen in sechs Freiheitsgraden im Seegang vorgestellt. Die Längs- und die Rollbewegung werden bei Ansatz nichtlinearer hydrostatischer Kräfte berechnet, während die übrigen vier Freiheitsgrade linearisiert hydrodynamisch nach der Streifenmethode erfaßt werden. Nichtlineare Kopplungen zwischen den zwei Bewegungsarten werden berücksichtigt.

Simulationsrechnungen werden mit systematisch variierten Daten von metazentrischer Höhe, Geschwindigkeit, Seegang, sowie Wellenhöhe und Kurswinkel durchgeführt.

Die Kenterhäufigkeiten bzw. die maximalen Rollwinkel eines Beispielschiffes werden aufgetragen und Frequenzverhältnissen von der Rolleigenfrequenz und verschiedenen Erregerfrequenzen zugeordnet.

Eine Beurteilung erfolgt in Hinsicht auf eine Gefährdung des Schiffes.

## 2 Abkürzungsverzeichnis

$A(x)$	Getauchte Spantfläche des Schiffes an der Stelle $x$
AR	Rückstellmoment
$A_{ij}$	hydrodynamische Massenträgheitskoeffizienten
$B$	Schiffsbreite
$b_s$	Breite der Schlingerkiel
$C_{\varphi\varphi}$	Rückstellkoeffizient des aufrichtenden Momentes
$c_D$	Widerstandsbeiwert
$D_{ij}$	hydrodynamische Dämpfungskoeffizienten
$d_L$	lineare Rolldämpfungskonstante auf die x-Achse bezogen
$d_Q$	quadratische Rolldämpfungskonstante auf die x-Achse bezogen
$F_y$	horizontale Querkraft durch die Welle
$g$	Erdbeschleunigung
$\overline{GM}$	metazentrische Höhe
$J$	Faktor für Erhöhung der Umströmungsgeschwindigkeit
$k_n$	Wellenzahl der Seegangskomponente $n$
$\overline{KG}(x)$	Höhe des Schwerpunktes der Massenbelegung über der Kiellinie
$\overline{KG}_s$	Gewichtsschwerpunktshöhe des Schiffes über Kiel
$L$	Länge des Schiffes
$l_s$	Schlingerkiellänge
$M_\varphi$	Rollmoment
$M_\psi$	Giermoment
MW	statisch krängendes Moment
$m$	Masse des Schiffes (ohne hydrodynamische Anteile)
$m^*$	Masse des Schiffes einschließlich der hydrodynamischen Masse für Längsbeschleunigung
$R$	Widerstand des Schiffes
$r$	Abstand der Schlingerkiel vom Rollzentrum
$\Delta R$	Zusatzwiderstand durch die Wellen
$\Delta R_n$	Widerstandserhöhung aus einer Seegangskomponente $n$
$t$	Zeit
$T$	aktueller Tiefgang des Schiffes
$T_S$	Propellerschub ohne Soganteil
$t$	Zeit
$tr$	aktueller Trimm
$w(x)$	horizontale Auslenkung (Pantokarene) des Schwerpunktes der getauchten Spantfläche an der Stelle $x$
$x_G$	x-Koordinate des Gewichtsschwerpunktes

$\ddot{y}$	Querbeschleunigung
$\ddot{z}$	Vertikalbeschleunigung am Hauptspant
$z_G$	z-Koordinate des Gewichtsschwerpunktes
$\nabla$	Verdrängung
$\gamma$	Spitzenüberhöhungsfaktor
$\varepsilon$	Phasenlage
$\hat{c}_n$	Komplexe Amplitude der Seegangskomponente $n$
$\eta$	Verschiebung des Schiffes in $y$ -Richtung
$\vartheta$	Stampfwinkel
$\ddot{\vartheta}$	Stampfwinkelbeschleunigung
$\Theta_x$	Trägheitsmoment des Schiffes um die $x$ -Achse
$\Theta_{xz}$	Deviationsmoment
$\Theta_z$	Trägheitsmoment des Schiffes um die $z$ -Achse
$\lambda_n$	Wellenlänge der Seegangskomponente $n$
$\mu_n$	Begegnungswinkel der Seegangskomponente $n$
$\mu(x)$	Masse pro Länge des Schiffes und der Ladung an der Stelle $x$
$\xi$	Verschiebung des Schiffes in $x$ -Richtung, die der mittleren Bewegung überlagert ist
$\dot{\xi}$	Zusatzgeschwindigkeit des Schiffes in Fahrtrichtung
$\ddot{\xi}$	Beschleunigung des Schiffes in Fahrtrichtung
$\rho$	Flüssigkeitsdichte
$\varphi$	Rollwinkel
$\dot{\varphi}$	Rollgeschwindigkeit
$\ddot{\varphi}$	Rollbeschleunigung
$\psi$	Gierwinkel
$\ddot{\psi}$	Gierbeschleunigung
$\omega_{0n}$	Kreisfrequenz der Seegangskomponente $n$
$\omega_{en}$	Begegnungsfrequenz der Seegangskomponente $n$

### 3 Einleitung

Aussagen über das Rollverhalten von Schiffen im Seegang sind für die Beurteilung von deren Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von großer Bedeutung. Für die Sicherheit der Schiffe und deren Ladung ist es wichtig, große Rollwinkel, große Rollbeschleunigungen und - als Extremfall - das Kentern zu vermeiden. Die Wirtschaftlichkeit eines Schiffes wird durch eine Optimierung der Fahrtroute bezüglich des Brennstoffverbrauches und das Vermeiden von Überdimensionierungen der Verbände positiv beeinflusst.

Belastungen eines Schiffes im natürlichen Seegang, der als Überlagerung vieler regelmäßiger Seegangskomponenten dargestellt wird, sind durch Addition der Wirkungen dieser Komponenten für die Tauch- und Stampfbewegung berechenbar, da hier die Reaktionen des Schiffes nahezu proportional zur Wellenhöhe sind. Diese Linearisierung bezüglich der Wellenhöhe ist für die Freiheitsgrade Roll-, Quer-, Gier- und Längsbewegung im allgemeinen nicht zulässig.

Um dennoch Aussagen über das Rollverhalten von Schiffen treffen zu können, sind Modellversuche oder Simulationsrechnungen möglich. Im Entwurfsstadium scheidet das Durchführen von Versuchen mit dem Schiff naturgemäß aus, jedoch können Auswertungen von Meßreisen für zukünftige Neubauten von Bedeutung sein, auch wenn der Seegang zum Zeitpunkt der Messungen oft nicht eindeutig bekannt ist. Modellversuche sind aufgrund der hohen Kosten und des Zeitbedarfes nur selten zu realisieren; es sei hier nur auf die Literatur verwiesen [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10] und [11].

Simulationsrechnungen, bei denen die Lage des Schiffes zu einem späteren Zeitpunkt  $t_2$ , aus der Lage, der Geschwindigkeit und den Kräften zum Zeitpunkt  $t_1$  ermittelt werden, ermöglichen es, das Rollverhalten eines Schiffes zu berechnen. Voraussetzung für solche Simulationen ist das Vorliegen eines Liniennisses, die Annahme eines Beladungszustandes und die Annahme der den Seegang charakterisierenden Größen.

## 4 Bestehende Verfahren zur Berechnung von Rollbewegungen

Existierende Verfahren, mittels derer man Aussagen über das Rollverhalten treffen kann, sind u.a. von Grim [12], Krappinger [13], Abicht [14], Paulling [15], und Söding [16], [17] bekannt. Böttcher, Söding und Petey [18] entwickeln zur Zeit ein weiteres Verfahren.

### 4.1 Verfahren von Grim

Das Verfahren von Grim ermöglicht Aussagen über das Verhalten von Schiffen in Wellen, die das Schiff genau von vorn oder genau von achtern treffen. Dann kann das Schiff durch periodische Änderungen der metazentrischen Höhe zu Rollschwingungen angeregt werden. Die in Schiffslängsrichtung laufende See verändert als Funktion der Zeit die Größe und Form der vom Schiff verdrängten Wassermasse. Es werden dadurch Tauch- Stampf- und Längsschwingungen, sowie Änderungen der aufrichtenden Momente bei Krängungen erregt. Aus Symmetriegründen wird bei den zugrunde liegenden Begegnungswinkeln kein Rollmoment erzeugt; das Schiff kann aber durch eine periodische Änderung der metazentrischen Höhe zu Rollschwingungen angeregt werden. Grim bestätigte dies sowohl experimentell als auch theoretisch.

Die theoretische Beweisführung geht von der Gleichung (1) für den Rollwinkel  $\varphi$

$$\Theta \ddot{\varphi} + D \dot{\varphi} + g \Delta \left[ \overline{GM}_0 + \Delta \overline{GM} \sin(\omega_e t) \right] \varphi = 0 \quad (1)$$

aus.

Darin sind  $\Theta$  das Trägheitsmoment um die Schiffslängsachse,  $D$  der Dämpfungskoeffizient,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $\Delta$  die Masse des Schiffes,  $\overline{GM}_0$  die metazentrische Höhe für Glattwasser und  $\Delta \overline{GM}$  die halbe Schwankung der metazentrischen Höhe zwischen den Werten für Wellenberg- und Wellentallage,  $\dot{\varphi}$  ist die Rollgeschwindigkeit und  $\ddot{\varphi}$  die Rollbeschleunigung,  $t$  ist die Zeit und  $\omega_e$  die Begegnungsfrequenz zwischen Schiff und Welle. Die Koeffizienten  $\Theta$ ,  $D$ ,  $\overline{GM}_0$ , und  $\Delta \overline{GM}$  werden als von der Zeit unabhängig vorausgesetzt.

Die Gleichung (1) ist in der Mathematik ohne das Dämpfungsglied als Mathiesche Differentialgleichung bekannt. Die triviale Lösung  $\varphi = 0$  der Mathieschen Differentialgleichung weist instabile Bereiche auf in der Umgebung aller halb- und ganzzahligen Verhältnisse zwischen der Periode  $2\pi/\omega_e$  der erregenden  $\overline{GM}$ -Änderung und der mit dem mittleren  $\overline{GM}_0$ -Wert berechneten Rolleigenperiode des Schiffes.

Da die Bewegungsgleichung (1) für die Rollschwingung bei längslaufenden regelmäßigen Wellen als maßgebend angesehen wird, wird erwartet, daß das Schiff nicht für alle Frequenzverhältnisse in seiner aufrechten Schwimmlage verharrt, sondern in der Umgebung der oben beschriebenen Verhältnisse zu Rollschwingungen angeregt wird.

Dieses Phänomen ist von Grim auch experimentell nachgewiesen worden. Er führte Modellversuche in glattem Wasser mit einer Erregung durch ein umlaufendes Gewicht durch. In der Mitte des Modells wurde eine Kurbel mit querschiffs liegender Achse gelagert. Die Kurbel trug am Ende ein Gewicht und wurde durch einen Motor angetrieben. Das Modell konnte sich völlig frei nach allen Seiten bewegen. Durch die in der Längsschiffsebene umlaufende Unwucht veränderte sich die metazentrische Höhe des Schiffes periodisch. Das

umlaufende Gewicht erzeugte auch Stampf-, Tauch- und Längsbewegungen, doch erschienen deren Auswirkungen auf die Rollbewegung klein.

Für ein solches Modell gilt, da die metazentrische Höhe periodisch geändert wird, ebenfalls wie in längslaufender See die Bewegungsgleichung (1). Beim Modell erfolgt die Erregung nicht durch eine Änderung des momentanen Metazentrums, sondern durch eine Änderung der Höhenlage des Gewichtsschwerpunktes. Die Bewegungsgleichung läßt jedoch für die dadurch erzeugte Rollbewegung keinen Unterschied erkennen, sodaß es von Grim für richtig erachtet wird, die Gültigkeit der Bewegungsgleichung und die Rolle der Dämpfungskraft auf diese Weise zu überprüfen. Dies wurde durch die Versuchsergebnisse bestätigt. Grim maß Kurven, die Resonanzbereiche ungeschlossen. In den einzelnen Resonanzbereichen wurden große Rollschwingungen erregt. Die Periode dieser Rollschwingungen blieb immer annähernd gleich der Eigenperiode. Es konnten bei einem kleinen  $\overline{GM}$ -Wert vier verschiedene Resonanzstellen für Periodenverhältnisse der erregenden Stabilitätsänderung zur Eigenperiode des Schiffes von 0.5, 1, 1.5 und 2 nachgewiesen werden. Bei einem größeren  $\overline{GM}$ -Wert konnten nur die ersten zwei Resonanzstellen beobachtet werden. Die Amplituden der Rollschwingungen wurden mit wachsendem Frequenzverhältnis niedriger. Die Bewegungsgleichung (1) reicht nicht aus, um die gekrümmte Form der Resonanzkurve zu beschreiben. Diese Gleichung gilt nur für kleine Rollwinkel. Da die Messungen große Rollwinkel ergaben, schlägt Grim vor, die metazentrische Höhe durch die Gleichung (2) zu berücksichtigen.

$$\overline{GM} = \overline{GM}_0 + \frac{1}{2}\overline{BM} \tan^2 \varphi \quad (2)$$

Hierin ist  $\overline{BM}$  die Höhe des Metazentrums über dem Verdrängungsschwerpunkt. Diese Gleichung gilt bis zum Eintauchen des Deckes oder Austauchen des Schiffsbodens hinreichend genau. Die Bewegungsgleichung (1) muß daher die Form (3) haben.

$$\Theta \ddot{\varphi} + D\dot{\varphi} + g\Delta \left[ \overline{GM}_0 + \frac{1}{2}\overline{BM} \tan^2 \varphi + \Delta \overline{GM} \sin(\omega_e t) \right] \sin \varphi = 0 \quad (3)$$

Die Lösungen dieser Differentialgleichung unter der Berücksichtigung der oben beschriebenen Einschränkungen zeigen gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Die von Grim aufgenommenen Kurven zeigen deutlich, daß für die Rollbewegung nicht nur die anfängliche metazentrische Höhe, sondern auch die Form der Stabilitätskurven von Bedeutung ist.

Grim führte weitere Versuche mit einem Modell durch, das senkrecht zu den Wellenkämmen ohne Fahrt so festgehalten wurde, daß Rollschwingungen möglich waren. Das Modell kam vor allem in dem ersten halbperiodischen Resonanzbereich in sehr große Rollschwingungen. Somit wurde auch experimentell der Nachweis erbracht, daß die durch längslaufende Wellen verursachten Änderungen der metazentrischen Höhe starke Rollschwingungen erregen können. In [12] werden ferner die Kopplungen zwischen der Roll-Stampf- und Gierschwingung ermittelt, und es wird gezeigt, daß eine Beeinflussung der Rollbewegung durch die Stampfbewegung möglich ist. Auch für diesen Fall wurde nachgewiesen, daß sich das Bewegungsverhalten durch die Mathieschen Differentialgleichung gut annähern läßt.

## 4.2 Verfahren von Krappinger

Krappinger [13] betrachtet ein in achterlichem natürlichen Seegang fahrendes Schiff, auf das ein krängendes Moment wirkt. Das Schiff rollt und kentert schließlich. Der Einfluß des

Seeganges während der Zeit zwischen maximaler Krängung nach einer Seite und der folgenden Krängung zur anderen Seite mit eventuellem Kentern wird genauer untersucht. In regelmäßigen Wellen schwankt das aufrichtende Moment periodisch um einen Mittelwert. Diese Schwankung ist am größten, wenn die Wellenlänge ungefähr gleich der Schiffslänge ist. Vereinfachend wird für die kurze Zeit des Kenterns die Schwankung des Momentes infolge des natürlichen Seegangs durch ein harmonisch um einen Mittelwert schwankendes Moment angenähert und angenommen, daß die Periode dieser Schwankung gleich der Begegnungsperiode des Schiffes mit den Wellen ist. Krappinger weist darauf hin, daß man fast zu denselben Ergebnissen käme, wenn man für den betrachteten kritischen Zeitraum den Seegang durch eine regelmäßige Ersatzwelle annähert, deren Wellenlänge etwa gleich der Schiffslänge ist, und dafür die Schwankungen des Moments bestimmt. Die Amplitude der Schwankung des Momentes ist für ein bestimmtes Schiff eine Funktion der Wellenhöhe. Unter diesen Voraussetzungen kann die Bewegung eines Schiffes von einem maximalen, der anschließenden Kenterung entgegengesetzten Winkel, bis zu der Kenterung durch die Differentialgleichung ( 4 )

$$\Theta' \ddot{\varphi} + D \dot{\varphi} + g \Delta \left[ h(\varphi) + \Delta h(\varphi) \sin \left( \frac{2\pi}{T_0} t + \epsilon \right) \right] = g \Delta h_{kr}(\varphi) \quad (4)$$

mit den Anfangsbedingungen für den Zeitpunkt  $t = 0$  :

$$\varphi(0) = \varphi_k; \quad \dot{\varphi}(0) = 0$$

beschrieben werden. Die Lage des Schiffes zur Welle zur Zeit  $t = 0$  wird durch die Phasenlage des Schiffes ( $0 \leq \epsilon \leq 2\pi$ ) gekennzeichnet. In Gleichung ( 4 ) ist  $\Theta'$  ein scheinbares Trägheitsmoment,  $h(\varphi)$  der Hebelarm des aufrichtenden Momentes,  $\Delta h(\varphi)$  die Schwankung der aufrichtenden Hebelarme in achterlichem regelmäßigen Seegang,  $T_0$  die Begegnungsperiode und  $t$  die Zeit. Der Hebel des krängenden Momentes wird mit  $h_{kr}$  bezeichnet. Krappinger zeigt, daß man unter Voraussetzungen über die Dämpfung, über das krängende Moment und die Begegnungsperiode, die praktisch immer erfüllt sind, mit Hilfe der Gleichung (4) für jedes  $\epsilon$  und  $\Delta h(\varphi)$  sowohl solche Anfangsamplituden  $\varphi_k$  finden kann, nach denen das Schiff während der Überholperiode kentert, als auch solche, bei denen das Schiff nicht kentert. Damit das Schiff kentert, muß eine bestimmte Mindestrollamplitude mit einer bestimmten Lage des Schiffes in der Welle und einer bestimmten Wellenhöhe zusammentreffen.

Als Ergebnis von umfangreichen Berechnungen werden von Krappinger Wahrscheinlichkeitskriterien für *sichere* und *unsichere* Schiffe hergeleitet. Auf Einzelheiten dieser Kriterien soll nicht näher eingegangen werden.

### 4.3 Verfahren von Abicht

Abicht [14] beschränkt sich bei seiner Herleitung eines Bewertungskriteriums für die Sicherheit eines Schiffes auf nachlaufenden unregelmäßigen Seegang. Dieser Seegang wird als eindimensional angenommen, d.h. die Laufrichtung aller ihn darstellenden Seegangskomponenten ist gleich. Die Gleichung der Wellenerhebung einer Seegangskomponente ist in ( 5 ) wiedergegeben.

$$Z(x, t) = c \cos \left( \omega t - \frac{\omega^2 x}{g} + \epsilon \right) \quad (5)$$

Die Wellenerhebung  $Z$  ist eine Funktion des Ortes  $x$  und der Zeit  $t$ ;  $\omega$  ist die Kreisfrequenz der Welle und  $\epsilon$  eine zufällige Phasenverschiebung. Überlagert man  $N$  solcher Seegangskomponenten, so erhält man für den unregelmäßigen Seegang die Beziehung ( 6).

$$Z(x, t) = \sum_{n=1}^N c_n \cos \left( \omega_n t - \frac{\omega_n^2 x}{g} + \epsilon_n \right) \quad (6)$$

Dieser unregelmäßige Seegang wird durch eine Ersatzwelle nach Grim [19] angenähert. Die Kontur des Seeganges im Bereich der Schiffslänge wird so durch eine Cosinuskurve ersetzt, daß die Summe der Quadrate der Abweichungen ein Minimum annimmt. Diese Cosinuskurve hat ihr Maximum oder Minimum in der Mitte der Schiffslänge. Für die Seegangserhebung  $Z$  an einem Ort  $\xi$  innerhalb des Bereiches  $L$  gilt für den Zeitpunkt  $t$  ( 7), für die Ersatzwellenkontur gilt für denselben Zeitpunkt ( 8).  $x_1$  ist der Ort, an dem die Annäherung durchgeführt wird.

$$Z(\xi, t) = \sum_{n=1}^N c_n \cos \left( \omega_n t - \frac{\omega_n^2 (x_1 + \xi)}{g} + \epsilon_n \right) \quad (7)$$

$$Z_{ers}(\xi, t) = \eta(t) \cos \left( \frac{2\pi\xi}{L} \right) \quad (8)$$

Aus der Bedingung ( 9) ergibt sich für die Amplitude der Ersatzwelle ( 10).

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} [Z(\xi) - Z_{ers}(\xi)]^2 d\xi \longrightarrow Min.! \quad (9)$$

$$\eta = \sum_{n=1}^N c_{\eta,n} \cos \left( \omega_n t - \frac{\omega_n^2 x_1}{g} + \epsilon_n \right) \quad (10)$$

mit

$$c_{\eta,n} = c_n \left[ \frac{-\frac{\omega_n^2 L}{g} \sin \left( \frac{\omega_n^2 L}{2g} \right)}{\pi^2 - \left( \frac{\omega_n^2 L}{2g} \right)^2} \right] \quad (11)$$

Jedem Wertepaar  $x_1, t$  wird auf diese Weise ein  $\eta$ -Wert zugeordnet, der wie der Seegang eine Zufallsgröße ist. In einem zweiten Schritt wird die zeitliche Folge von  $\eta$ -Werten betrachtet, die sich ergibt, wenn der Ort  $x_1$  an dem der Seegang über einen vorgegebenen Bereich  $L$  durch Cosinuswellen angenähert wird, festgehalten wird. Dieser unregelmäßige  $\eta(t)$ -Verlauf wird wiederum über einen Bereich durch eine Sinuswelle der Länge  $L$  ersetzt, deren Wellenberg bzw. Wellental an der Stelle  $x_1$  liegt und deren Höhe sich während des gewählten Zeitbereiches  $T$  nach einer harmonischen Funktion ändert. Die Amplitude dieser stehenden Ersatzwelle wird auch nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate bestimmt. Die Anfangslage der stehenden Welle zur Zeit  $t = t_1$  wird durch den Phasenwinkel  $\epsilon$  gekennzeichnet. Die Gleichung ( 12) beschreibt die Amplitude der cosinusförmigen Ersatzwelle am Ort  $x_1$  zu einer Zeit  $\tau$  innerhalb des sich an die Zeit  $t_1$  anschließenden Zeitbereiches  $T_0$ .

$$\eta(\tau) = \sum_{n=1}^N c_{\eta,n} \cos \left( \omega_n [t_1 + \tau] - \frac{\omega_n^2 x_1}{g} + \epsilon_n \right) \quad (12)$$

Diese Funktion soll durch den Ausdruck ( 13) angenähert werden,

$$\eta_{ers}(\tau) = \eta_{\sim} \sin(\omega_0 \tau + \epsilon) \quad (13)$$

so daß ( 14) gilt.

$$\int_0^{T_0} [\eta(\tau) - \eta_{ers}(\tau)]^2 d\tau \longrightarrow Min.! \quad (14)$$

Dieses Minimum wird dann erreicht, wenn für die Amplitude der Ausdruck ( 15) gilt.

$$\eta_{\sim} = \sum_{n=1}^N c_{\eta_{\sim},n} \cos \left( \omega_n t_1 - \frac{\omega_n^2 x_1}{g} + \epsilon_n \right) \quad (15)$$

mit

$$c_{\eta_{\sim},n} = c_{\eta,n} \left[ \frac{2 \sqrt{\cos^2 \epsilon_n + \left[ \frac{\omega_n}{\omega_0} \right]^2} \sin \epsilon_n \sin \left( \pi \frac{\omega_n}{\omega_0} \right)}{\pi \left( 1 - \left[ \frac{\omega_n}{\omega_0} \right]^2 \right)} \right] \quad (16)$$

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, wie der Seegang im Bereich von  $-L/2$  bis  $+L/2$  im Zeitbereich von  $t_1$  bis  $t_1 + T_0$  durch eine stehende Ersatzwelle angenähert werden kann. Um den Einfluß des unregelmäßigen Ersatzseeganges auf das Rollverhalten eines im achterlichen Seegang fahrenden Schiffes zu untersuchen, wechselt Abicht das Bezugssystem und beschreibt den Seegang bzw. den Ersatzseegang in einem schiffsfesten Koordinatensystem mit Ursprung am Hauptspant des Schiffes. Da eine konstante Geschwindigkeit des Schiffes vorausgesetzt wird, sind die auf das Schiff bezogenen Größen, da auch der jeweilige Ort der Beobachtung ( $x = v \cdot t$ ) vorgegeben ist, nur zeitabhängig. Für die Seegangserhebung ( 6) ergibt sich mit ( 17) die Beziehung ( 18).

$$\omega_{en} = \omega_n - \frac{\omega_n^2 v}{g} \quad (17)$$

$$Z^*(t) = \sum_{n=1}^N c_n \cos(\omega_{en} t + \epsilon_n) \quad (18)$$

Die Rollschwingungen, zu denen das im nachlaufenden unregelmäßigen Seegang fahrende Schiff angeregt wird, entstehen durch die sich mit der Seegangskontur ändernde Form des Unterwasserschiffes und die damit verbundene Änderung des Rückstellmomentes. Eine starke Rollbewegung wird bei einer periodischen Änderung der Hebelarme erwartet. Eine periodische Hebelarmänderung ist dadurch gekennzeichnet, daß der jeweils bei einer bestimmten Schiffsneigung vorhandene aufrichtende Hebelarm  $h$  nach Ablauf einer Periode  $T_0$  wieder denselben Wert annimmt. Dieser Sachverhalt wird durch die Beziehung ( 19) wiedergegeben.

$$h(\varphi, t) = h(\varphi, t + T_0) \quad (19)$$

Dies ist der Fall, wenn eine regelmäßige Welle das Schiff passiert (veränderliche Lage der Welle zum Schiff bei konstanter Wellenhöhe) oder wenn sich das Schiff in einer stehenden Welle (veränderliche Wellenhöhe bei ständiger Wellenberg- bzw. Wellentallage) befindet.

Abicht geht davon aus, daß bei gleicher Form, Amplitude, Periode und Anfangsbedingungen für übliche Schiffsförmungen die Unterschiede in den Hebelarmschwankungen gering sind, und daß daher auch der Bewegungsablauf  $\varphi(t)$  in beiden Fällen nahezu gleich ist.

Er sieht es deshalb als zulässig an, die Rollbewegungen im unregelmäßigen Seegang mit Hilfe der oben beschriebenen Ersatzwelle zu berechnen. Hierfür nimmt er die Differentialgleichung ( 20) an, die für die Rollschwingung eines Schiffes unter Vernachlässigung der Dämpfung gilt.

$$\Theta \ddot{\varphi} + mgh(\varphi, \tau) = 0 \quad (20)$$

Hierin sind  $\Theta$  das Massenträgheitsmoment,  $m$  die Schiffsmasse. Die aufrichtenden Hebelarme werden für unterschiedliche Wellenhöhen jeweils für die Wellenberg- und Wellentallage in Abhängigkeit vom Krängungswinkel  $\varphi$  in Sinuswellen von der Länge des Schiffes berechnet. Abicht nimmt die Größen Displacement, Masenträgheitsmoment und den Trägheitsradius des Schiffes unter der Berücksichtigung der hydrodynamischen Massen als konstant an. Bei der numerischen Integration von ( 20) geht er als Anfangsbedingung von einem Umkehrpunkt der Rollbewegung aus, d.h. zur Zeit  $\tau = 0$  beträgt die Vorkrängung des Schiffes  $\varphi_0$  und ist die Rollgeschwindigkeit  $\dot{\varphi} = 0$ ; die Rollbeschleunigung wird aus der Bewegungsgleichung ( 20) bestimmt, indem für  $h(\varphi, \tau)$  der zu dieser Vorkrängung gehörige Hebelarm berechnet wird. Die Anfangsphase und -amplitude der stehenden Welle wird dabei jeweils konstant gehalten. Der sich an die vorgegebenen Anfangswerte anschließende Bewegungsablauf  $\varphi(\tau)$  wird bis zur Zeit  $\tau = T_0$  berechnet.

Derartige Berechnungen wurden von Abicht für verschiedene Anfangskrängungen durchgeführt. Es wurden die jeweils kleinsten Anfangsneigungen, die innerhalb der Zeit  $T_0$  zu einer Kenterung des Schiffes führten, ermittelt. Diese sind von der Anfangsphase und der Anfangsamplitude der stehenden Welle abhängig.

Abicht ermittelt dann die Wahrscheinlichkeit, daß ein Schiff in einem bestimmten Ladezustand, Seezustand und Betriebszustand (Kurswinkel und Geschwindigkeit) nach einem Maximal- oder Minimalwert des Rollwinkels nach der entgegengesetzten Seite kentert. Er führt einen  $W_k$ -Wert ein, mit dessen Hilfe die Sicherheit eines Schiffes auch im Entwurfsstadium beurteilt werden kann. Abicht schlägt vor, daß dieser Wert, (auf den hier nicht weiter eingegangen werden soll), für *sichere* Schiffe eine bestimmte Größe unterschreiten sollte.

#### 4.4 Verfahren von Söding

Söding [16] legt der Simulation die Gleichung ( 21) zugrunde.

$$\Theta_x \ddot{\varphi} + d_L \dot{\varphi} + d_Q \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + (g + \ddot{z}) mh(\varphi, \epsilon) - \Theta_{xz} \ddot{\vartheta} \sin \varphi = \Theta_x \ddot{\varphi}_L + D_L \dot{\varphi}_L + g m \overline{GM} \varphi_L + MW \quad (21)$$

Darin sind  $\Theta_x$  das Trägheitsmoment des Schiffes um die Rollachse,  $d_L$  die lineare Rolldämpfungskonstante,  $d_Q$  die quadratische Rolldämpfungskonstante,  $\ddot{z}$  die nach der Streifenmethode berechnete Vertikalbeschleunigung am Hauptspant,  $m$  die Masse des Schiffes incl. der Ladung,  $h(\varphi, \epsilon)$  der aufrichtende Hebelarm abhängig vom Krängungswinkel  $\varphi$  und der Phasenlage  $\epsilon$ ,  $\Theta_{xz}$  das Deviationsmoment,  $\ddot{\vartheta}$  die nach der Streifenmethode berechnete Stampfwinkelbeschleunigung,  $\varphi_L$  der (unrealistische) Rollwinkel, der sich aus den nach der Streifenmethode berechneten Übertragungsfunktionen für eine Wellenerhebung am Hauptspant ergibt,  $D_L$  die diesen Berechnungen zugrunde liegende Dämpfungskonstante. Söding nimmt bei seinen Berechnungen an, daß die Rolldämpfungskonstante  $D_L$  praktisch allein durch am Schiff angebrachte Schlingerdämpfungsflossen großer Fläche bestimmt wird. Die Dämpfungskonstanten  $d_L$  und  $d_Q$  werden nach Blume [22] bestimmt.

Der aufrichtende Hebelarm wird nach der Beziehung ( 22) bestimmt.

$$h(\varphi, \epsilon) = [h_R(\varphi, \epsilon) - h_G(\varphi)] \frac{\zeta_A}{\zeta_R} + h_G(\varphi) \quad (22)$$

Hierin ist  $h_R(\varphi, \epsilon)$  der Hebelarm in einer regelmäßigen Welle der Amplitude  $\zeta_R$  und der Phase  $\epsilon$ . Der Hebelarm  $h_G(\varphi)$  ist der im glatten Wasser.

Zur Definition von  $\zeta_A$  und  $\epsilon$  werden die Übertragungsfunktionen (23) und (24) festgelegt.

$$Y_1 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{2\pi L}{\lambda} \cos \mu \right) \right] \quad (23)$$

$$Y_2 = iY_1 \quad (24)$$

$Y_1$  ist die Übertragungsfunktion für die halbe Differenz zwischen der Tauchung am Hauptspant und dem Mittelwert der Tauchung an den beiden Schiffsenden;  $Y_2$  unterscheidet sich von  $Y_1$  nur durch einen Phasenunterschied von  $90^\circ$ .  $\mu$  ist der Begegnungswinkel zwischen Schiff und Welle und  $\lambda$  ist die Wellenlänge.

Söding definiert durch die unregelmäßige Schwankung der Wellenerhebung  $\zeta$  an einem Punkt des Schiffes und die beiden Übertragungsfunktionen zwei unregelmäßig schwankende Größen (Gaußprozesse)  $h_1$  und  $h_2$  ( 25),( 26).

$$h_1 = \mathcal{F}^{-1}(Y_1 \mathcal{F}(\zeta)) \quad (25)$$

$$h_2 = \mathcal{F}^{-2}(Y_2 \mathcal{F}(\zeta)) \quad (26)$$

Dabei bezeichnet  $\mathcal{F}$  eine Fourier-Transformation. Mit  $h_1$  und  $h_2$  lassen sich Amplitude und Phase einer effektiven (für die Hebelarme wesentlichen) Welle bestimmen ( 27), ( 28)

$$\zeta = \sqrt{h_1^2 + h_2^2} \quad (27)$$

$$\epsilon = \arctan\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad (28)$$

Die Bewegungsgleichung ( 21) integriert Söding mit einem Runge-Kutta-Verfahren vierter Ordnung mit konstanter Schrittweite. Dieses Simulationsverfahren berücksichtigt Kopplungen des Rollens mit der Quer- und Gierbewegung und nichtlineare Kopplungen mit der Tauch- und Stampfbewegung. Weitere Kopplungen werden nicht berücksichtigt.

#### 4.5 Verfahren von Söding, Böttcher und Petey

Söding, Böttcher und Petey [18] simulieren Schiffsbewegungen großer Amplitude im steilen Seegang. Der Seegang wird als Überlagerung von sinusförmigen Wellen erzeugt. Damit sind sowohl regelmäßige Wellen als auch kurzkämmiger Seegang beliebiger Richtung darstellbar. Bei diesem Simulationsverfahren werden die Schiffsbewegungen in allen sechs Freiheitsgraden in unregelmäßigem Seegang ermittelt. Die hydrodynamischen Kräfte infolge der Relativbewegung zwischen Schiff und Wellen werden analog zur Streifenmethode aus den Kräften auf die Schiffsquerschnitte bestimmt. Dabei werden die hydrodynamische Massen- und Dämpfungsmatrix und die erregenden Kräfte und Momente nicht für die mittlere, sondern für die aktuelle, wechselnde Tauchung und Krängung des betreffenden

Spantes bestimmt. Die Kräfte werden aus einem Anteil der vom Schiff nicht gestörten Welle (Froude-Krilow-Kräfte) und einem weiteren Anteil infolge der Schiffsbewegungen und der Störung der Wellen durch das Schiff, (Radiations- und Diffraktionskräfte) zusammengesetzt. Die Radiations- und Diffraktionskräfte  $\vec{f}(x, t)$  an einem Spant (zwei Kraftkomponenten und ein Moment abhängig von der Stelle  $x$  und der Zeit  $t$ ) hängen nicht nur von der aktuellen relativen Verschiebung  $\vec{u}(x, t)$  zwischen Spant und Wasser (zwei Translationen in  $y$ - und  $z$ -Richtung und eine Rotation um die  $x$ -Achse) sowie von  $\dot{\vec{u}}$  und  $\ddot{\vec{u}}$  ab, sondern auch von dem vorhergehenden Verlauf von  $\vec{u}$  an weiter vorn liegenden Schiffsquerschnitten. Dies wird durch den Zusammenhang ( 29) zwischen den Kräften und Momenten erfaßt.

$$\sum_{l=0}^{LL} \left( \frac{\partial}{\partial t} - v \frac{\partial}{\partial x} \right)^{l+1} (A_l \dot{\vec{u}}_x) = \sum_{l=0}^{LL} \left( \frac{\partial}{\partial t} - v \frac{\partial}{\partial x} \right)^l (B_L \cdot \vec{f}) \quad (29)$$

Dabei ist  $v$  die Wassergeschwindigkeit relativ zum Schiff in Schiffslängsrichtung.  $A_l$  und  $B_l$  sind 3x3-Matrizen, die von der Spantform und -tauchung, aber nicht von der Frequenz abhängen und nach einer nichtlinearen Regression aus der frequenzabhängigen Massen- und Dämpfungsmatrix bestimmt werden. Ergebnisse haben gezeigt, das der gesamte Frequenzbereich mit  $LL = 4$  erfaßt werden kann.

Dieses Verfahren ist das bei der Erstellung der Eingabedaten und im Verbrauch von Rechenzeit aufwendigste bekannte Simulationsverfahren.

#### 4.6 Verfahren von Paulling

Ein weiteres Simulationsverfahren ist von Oakley, Paulling und Wood an der University of California, Berkeley, entwickelt worden [15]. Hier wird das Schiff als starrer Körper angenommen und es werden alle sechs Freiheitsgrade berücksichtigt. Die Bewegungsgleichungen ( 30) und ( 31) resultieren aus dem zweiten Newton'schen Axiom.

$$\frac{d}{dt} m \hat{v} = \hat{F} \quad (30)$$

$$\frac{d}{dt} I \hat{\omega} = \hat{M} \quad (31)$$

Hierin sind  $t$  die Zeit,  $m$  die Schiffsmasse,  $\hat{v}$  die Geschwindigkeit des Massenschwerpunktes,  $\hat{F}$  der Kraftvektor,  $I$  die Trägheitsmatrix,  $\hat{\omega}$  der Drehgeschwindigkeitsvektor und  $\hat{M}$  der Momentenvektor bezüglich des Massenschwerpunktes. Die Kräfte und Momente resultieren aus der Schwerkraft, die im Massenmittelpunkt angreift, dem statischen Wasserdruck (Auftrieb), den Schiffsbewegungen und aus den Wechselwirkungen zwischen Schiff und Seegang. Für die Kräfte und Momente wird angenommen, daß sie auch von der zeitlichen Entwicklung der Lage des Schiffes im Seegang abhängen. Näherungsweise wird dieser zeitliche Entwicklungsprozeß durch die augenblickliche Lage, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Schiffes charakterisiert. Das Verhalten des Schiffes ist nichtlinear, da die Kräfte und Momente nichtlinear von den Schiffsbewegungen abhängen. Die zeitliche Ableitung des Drehimpulses in Gleichung ( 31) beinhaltet ebenfalls nichtlineare Terme. Die Autoren beschränken sich bei der Bestimmung von  $\hat{M}$  und  $\hat{F}$  auf den hydrostatischen Anteil der Kräfte und eine vereinfachte Berechnung der hydrodynamischen Anteile dieser Kräfte und Momente. Da große Bewegungsamplituden betrachtet werden, werden zwei kartesische Koordinatensysteme definiert.

Das Newton'sche Inertialsystem wird durch ein raumfestes  $0\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ -System definiert, das so orientiert ist, daß die  $\bar{x} - \bar{y}$ -Ebene der ungestörten Wasseroberfläche gleich ist und die  $\bar{z}$ -Achse nach oben zeigt. Das schiffsfeste Koordinatensystem  $Gxyz$  hat seinen Ursprung in  $G$ , dem Gewichtsschwerpunkt des Schiffes. Die  $x$ -Achse zeigt parallel zur Kiellinie nach vorn, die  $x$ - $z$ -Ebene liegt parallel zur Mittschiffsebene des Schiffes. Die  $z$ -Achse ist nach oben gerichtet, die  $y$ -Achse nach Steuerbord. Die Lage des Massenschwerpunktes des Schiffes wird in raumfesten Koordinaten durch ( 32) beschrieben.

$$\bar{x} = x_G; \bar{y} = y_G; \bar{z} = z_G \quad (32)$$

Die Beziehung ( 33) gibt diesen Verhalt als Vektor wieder.

$$\hat{x} = \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix} \quad (33)$$

Die Geschwindigkeit des Massenschwerpunktes wird durch den Vektor ( 34) beschrieben.

$$\hat{v} = \frac{d}{dt} \hat{x} = \begin{pmatrix} \frac{d}{dt} x_G \\ \frac{d}{dt} y_G \\ \frac{d}{dt} z_G \end{pmatrix} \quad (34)$$

Jede Drehung des schiffsfesten Koordinatensystems wird durch modifizierte Eulerwinkel eindeutig beschrieben. Das schiffsfeste Koordinatensystem wird vor der Drehung mit seinen Achsen parallel zum raumfesten Koordinatensystem angenommen. Diese Orientierung wird mit  $Gx_1y_1z_1$  bezeichnet. Eine Drehung dieses Koordinatensystems um den Gierwinkel  $\psi$  um die  $z_1$ -Achse hat die Orientierung  $Gx_2y_2z_1$  zur Folge. Eine weitere Drehung erfolgt um die  $y_2$ -Achse um den Stampfwinkel  $\vartheta$ , dies erzeugt die Orientierung  $Gx_2y_2z_3$ . Die letzte Drehung erfolgt um den Rollwinkel  $\varphi$  um die  $x_2$ -Achse. Die Orientierung ist jetzt  $Gxyz$ . Die Eulerwinkel werden als Vektor ( 35) dargestellt.

$$\hat{\alpha} = \begin{pmatrix} \varphi \\ \psi \\ \vartheta \end{pmatrix} \quad (35)$$

Die Drehgeschwindigkeiten im schiffsfesten Koordinatensystem können aus Drehgeschwindigkeiten im Inertialsystem berechnet werden. Die Komponenten in  $x$ -  $y$ - und  $z$ -Richtung werden mit  $p$ ,  $q$  und  $r$  bezeichnet. Diese Drehgeschwindigkeitskomponenten können in Abhängigkeit von den Eulerwinkel dargestellt werden ( 36).

$$\begin{aligned} p &= \frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\psi}{dt} \sin \vartheta \\ q &= \frac{d\psi}{dt} \cos \varphi \cos \vartheta + \frac{d\vartheta}{dt} \sin \varphi \\ r &= \frac{d\vartheta}{dt} \cos \varphi - \frac{d\psi}{dt} \sin \varphi \cos \vartheta \end{aligned} \quad (36)$$

Dies wird durch den Vektor ( 37) beschrieben

$$\hat{\omega} = \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (37)$$

Eine Matrix  $B$  wird zu ( 38) definiert

$$B = \begin{bmatrix} 1 & \sin \vartheta & 0 \\ 0 & \cos \varphi \cos \vartheta & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi \cos \vartheta & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (38)$$

Die Ableitung des Vektors  $\hat{\alpha}$  nach der Zeit ergibt (39)

$$\frac{d\hat{\alpha}}{dt} = \begin{Bmatrix} \frac{d\varphi}{dt} \\ \frac{d\psi}{dt} \\ \frac{d\vartheta}{dt} \end{Bmatrix} \quad (39)$$

Damit wird (36) die Beziehung (40)

$$\frac{d\hat{\alpha}}{dt} B = \hat{\omega} \quad (40)$$

Die Trägheits- und Deviationsmomente der Drehimpulsgleichung ( 31) lassen sich als ( 41) schreiben.

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Die Trägheitsmomente werden berechnet durch ( 42) bis ( 44).

$$I_{xx} = \sum m_i (y_i^2 + z_i^2) \quad (42)$$

$$I_{yy} = \sum m_i (z_i^2 + x_i^2) \quad (43)$$

$$I_{zz} = \sum m_i (x_i^2 + y_i^2) \quad (44)$$

Die Summation erfolgt über alle Teilmassen  $m_i$  mit den Koordinaten  $x_i, y_i, z_i$ . Die nach ( 42) bis ( 44) berechneten Trägheitsmomente der festen Schiffsmasse sind um die hydrodynamischen Trägheitsmomente zu ergänzen. Dies gilt auch für die Deviationsmomente, die nach ( 45) bis ( 47) berechnet werden.

$$I_{xy} = \sum m_i x_i y_i \quad (45)$$

$$I_{xz} = \sum m_i x_i z_i \quad (46)$$

$$I_{yz} = \sum m_i y_i z_i \quad (47)$$

Diese Trägheits- und Deviationsmomente werden im schiffsfesten Koordinatensystem als konstant angesehen. Somit wird der Drehimpulssatz in diesem Koordinatensystem durch die Beziehung ( 48) beschrieben.

$$\frac{d}{dt} I \hat{\omega} = I \frac{d}{dt} \hat{\omega} + \hat{\omega} \times I \hat{\omega} \quad (48)$$

Das in [15] vorgestellte Computerprogramm für die Simulation von Schiffsbewegungen großer Amplituden bestimmt die Kräfte und Momente, die auf das Schiff wirken, durch eine genaue Berechnung der hydrostatischen und der Froude-Krilow-Kräfte und eine Näherung

für die hydrodynamischen Kräfte. Die Näherung für die hydrodynamischen Kräfte besteht darin, daß die hydrodynamischen Massen-, Trägheits- und Deviationsmomente und die lineare und die quadratische Rolldämpfungskonstante als konstant angesetzt werden. Es werden von den Autoren keine großen Fehler durch diese Näherungen erwartet, solange die Froude-Krilow-Kraft dominierend ist. Dies wird so bei den am häufigsten auftretenden Kenterfällen in nachlaufender oder schrägachterlicher einkommender See für gegeben angenommen.

Es werden kleine Wellenamplituden vorausgesetzt, aber große Bewegungsamplituden zugelassen; deshalb können die für die mittlere Schwimmlage bestimmten hydrostatischen Rückstell- und Kopplungskoeffizienten nicht angenommen werden. Auch Paulling hat gezeigt (1961), daß signifikante Änderungen des aufrichtenden Momentes während des Passierens einer Welle und die Änderung dieses Momentes starke Rollamplituden verursachen können. Die bei der Simulation berechnete Froude-Krilow-Kraft beinhaltet die die Bewegung anregende Kraft, die Rückstellkraft und das Rückstellmoment. Diese Kräfte und das Moment werden aus der Lage des Schiffes im Seegang zu jedem Zeitschritt berechnet. Die Wellenerhebung wird als Summe von sinusförmigen Seegangskomponenten dargestellt. Die Wasseroberfläche wird durch ( 49) beschrieben.

$$\bar{\eta}(t, x, y) = \sum_{i=1}^N \eta_i(t, \bar{x}, \bar{y}) \quad (49)$$

Hierin sind  $\eta_i$  die z-Koordinate der Oberfläche und  $N$  die Anzahl der Seegangskomponenten. Die Amplituden dieser Komponenten werden durch ( 50) beschrieben.

$$\eta_i = A_i \cos(\bar{x}k_i \cos \mu_i - \bar{y}k_i \sin \mu_i + \epsilon_i - \omega_i t) \quad (50)$$

mit  $A_i$  der Amplitude der i-ten Seegangskomponente,  $\omega_i$  der Kreisfrequenz,  $\epsilon_i$  der Anfangsphase,  $k_i = \frac{\omega_i}{g}$  der Wellenzahl und  $\mu_i$  der Wellenfortschrittsrichtung. Der Wellendruck wird durch die Beziehung ( 51) gegeben.

$$p(t, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = -\rho g \bar{z} + \sum_{i=1}^N p_i(t, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}), \quad (51)$$

mit  $p_i = \rho g e^{k_i z} \eta_i$  und  $\rho g$  dem spezifischen Gewicht des Wassers.

Die Froude-Krilow-Kräfte und -Momente werden durch Integration der Druckgradienten über das gesamte Schiffsvolumen gebildet. Diese Kräfte und Momente sind im schiffsfesten Koordinatensystem (52) bis (57).

$$F_x = - \iiint \frac{\partial p}{\partial x} dV \quad (52)$$

$$F_y = - \iiint \frac{\partial p}{\partial y} dV \quad (53)$$

$$F_z = - \iiint \frac{\partial p}{\partial z} dV \quad (54)$$

$$M_x = \iiint \left( z \frac{\partial p}{\partial y} - y \frac{\partial p}{\partial z} \right) dV \quad (55)$$

$$M_y = \iiint \left( x \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial x} \right) dV \quad (56)$$

$$M_z = \iiint \left( y \frac{\partial p}{\partial x} - x \frac{\partial p}{\partial y} \right) dV \quad (57)$$

In den Gleichungen ( 52) bis ( 57) bedeuten  $dV$  ein Volumenelement,  $F_x$ ,  $F_y$  und  $F_z$  die Kräfte in den Indextrichtungen,  $M_x$ ,  $M_y$  und  $M_z$  die Momente um die Indextrichtungen. Die Integration erstreckt sich über das gesamte Volumen. Für jeden Zeitpunkt werden die Froude-Krilow-Kräfte für die Spanten durch Integration des Druckgradienten über den Spantumfang bestimmt. Für jeden Spant werden durchschnittliche Werte der vertikalen, horizontalen und der "Roll"-geschwindigkeit und -beschleunigung des Wassers bestimmt. Als "Roll"-geschwindigkeits- und "Roll"-beschleunigungskomponenten werden die ersten und zweiten zeitlichen Ableitungen der Steigungen von Linien gleichen Druckes in der Spantebene betrachtet. Die Produkte dieser Geschwindigkeits- und Beschleunigungskomponenten mit den angenäherten Koeffizienten ergeben die Diffraktionskräfte, die zu den Froude-Krilow-Kräften addiert werden, bevor die Integration über die Schiffslänge erfolgt.

Der Schiffsrumpf wird durch Polygone, die die Spanten darstellen, beschrieben. Jedes Polygon ist in einer Ebene bei konstantem  $x$  im schiffsfesten Koordinatensystem dargestellt. Das in [15] vorgestellte Simulationsprogramm kann unsymmetrische und nichtäquidistante Spanten verarbeiten.

Die Integration der Druckgradienten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen wird für jeden Spant, der aus geraden Liniensegmenten besteht, mit zwei Einschränkungen genau durchgeführt. Die Einschränkungen sind, daß der Stampfwinkel nicht so groß wird, daß die Spantkontur in einzelne Teile zerfällt und daß die Größenordnung des Produktes aus Stampfwinkel und Wellenschräge für alle Seegangskomponenten klein ist. Diese Einschränkungen sind für Schiffe mit üblichen Abmessungsverhältnissen und Wellen von realistischer Steilheit erfüllt. Die Beziehung ( 58) ist die Bestimmungsgleichung dieser Kräfte und Momente für jeden Spant.

$$f(x) = V' + \sum_{i=1}^N [c_i \cos(k_i x) + S_i \sin(k_i x)] \quad (58)$$

Darin sind  $V'$  der statische Teil des Druckes  $\rho g z$ ,  $c_i$  und  $S_i$  sind von der sinusförmigen Schwankung des Druckes abhängig und  $k_i$  ist die Komponente der Wellenzahl in  $x$ -Richtung. Die relativen Größen von  $c_i$  und  $S_i$  hängen für jeden Zeitpunkt von der Phasenlage der Wellen zum Ursprung des schiffsfesten Koordinatensystem ab. In diesem Simulationsmodell wird vereinfachend angenommen, daß sich  $V'$ ,  $c_i$  und  $S_i$  in Schiffslängsrichtung zwischen benachbarten Spanten linear ändern. Die Dämpfungskraft wird näherungsweise unter der Annahme bestimmt, daß  $P$  eine der Komponenten der Kraft  $\hat{F}$  oder des Momentes  $\hat{M}$  im schiffsfesten Koordinatensystem und  $\nu$  die dazugehörige Geschwindigkeits- oder Winkelgeschwindigkeitskomponente ist. Die Kraft oder das Moment kann dann nach der Beziehung ( 59) ermittelt werden.

$$P = P_{Welle} - \nu D - \nu |\nu| D_Q \quad (59)$$

Darin ist  $P_{Welle}$  die durch die Welle verursachte erregende Kraft oder das erregende Wellenmoment.  $D$  ist der lineare Dämpfungskoeffizient für die betrachtete Bewegungskomponente;  $D_Q$  ist der quadratische Dämpfungskoeffizient für diese Bewegungskomponente. Es werden drei Kraft- und drei Momentengleichungen der Form ( 59), die das schiffsfeste Koordinatensystem als Bezug haben, aufgestellt.

Die geschwindigkeitsabhängigen Kopplungen zwischen den Bewegungsgleichungen werden vernachlässigt. Die konstanten hydrodynamischen Massen und Trägheitsmomente

werden zu den Starrkörperelementen der Trägheitsmatrix ( 41) addiert. Die hydrodynamischen Massen werden bei den Kraftkomponenten in jeder Achsrichtung des schiffsfesten Koordinatensystems berücksichtigt. Dies geschieht durch ( 60).

$$P' = \frac{P}{1 + \frac{m''}{m}} \quad (60)$$

$P'$  ist die Kraft unter der Berücksichtigung der hydrodynamischen Masse,  $P$  die aus Gleichung ( 59) bestimmte Kraft,  $m''$  die hydrodynamische Masse für die betrachtete Bewegung und  $m$  die Schiffsmasse. Die nach ( 60) bestimmten Kräfte werden in die raumfesten Koordinaten umgerechnet.

Die Bewegungsgleichungen werden durch Simulation gelöst. Um Standardalgorithmen verwenden zu können, wurden die Bewegungsgleichungen als gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung geschrieben. Somit werden die Gleichungen ( 30) und ( 34) dann zu ( 61) und ( 62).

$$\frac{d}{dt} \hat{v} = \frac{1}{m} \hat{F} \quad (61)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = \hat{v} \quad (62)$$

In den Gleichungen ( 61) und ( 62) sind die Vektoren auf das raumfeste Koordinatensystem bezogen.

Die Drehungen des Schiffes werden durch die Drehimpulsgleichung ( 31) bestimmt. Aus der Gleichung ( 31) in Verbindung mit der Gleichung ( 40) folgen ( 63) und ( 64).

$$\frac{d}{dt} \hat{\omega} = I^{-1} [\hat{M} - \hat{\omega} \times I \hat{\omega}] \quad (63)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{\alpha} = B^{-1} \hat{\omega} \quad (64)$$

In Gleichung ( 63) ist  $\hat{M}$  der Momentenvektor bezogen auf das schiffsfeste Koordinatensystem.

Die Vektorgleichungen ( 61) bis ( 64) bilden ein System von zwölf gekoppelten gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung; dieses wird im vorgestellten Simulationsprogramm gelöst. Paulling verwendet dazu ein Prediktor-Korrektor-Verfahren fünfter Ordnung nach Adams, das von Glauz (1960) entwickelt wurde.

## 4.7 Verfahren von Hattendorf und Blume

Hattendorf und Blume [21] entwickelten ein Rechenmodell, das für genau von hinten kommende, regelmäßige Wellen anwendbar ist. Bei diesem Verfahren wird Gierstabilität vorausgesetzt, so daß keine Quer- und Gierbewegungen auftreten. Das Gleichgewicht der Kräfte in Richtung der Schiffslängsachse und der Momente um die gleiche Achse wird erfüllt.

Ferner wird angenommen, daß sich der Widerstand im glatten Wasser quadratisch mit der Schiffsgeschwindigkeit ändert und daß bei konstantem Moment an der Propellerwelle auch der Schub konstant ist.

Für die Widerstandsänderung durch die Welle wird ein von der Druckverteilung in der ungestörten Welle ausgehender Ansatz [22] verwendet. Der örtliche Auftrieb wird

darin normal zu Flächen gleichen Druckes angenommen. Die Horizontalkomponenten des Auftriebes, die durch Integration über die Schiffslänge bestimmt werden, ergeben eine Näherung für die Längskraft infolge der Wellen. Die Abminderung der Druckänderung durch die Welle mit der Tiefe wird durch eine Exponentialfunktion berücksichtigt. Die mit diesen Ansätzen gewonnene Gleichung für die Längsbewegung des Schiffes wird nach Vorgabe von Anfangswerten für die der mittleren Längsbewegung  $v_0 \cdot t$  überlagerte zusätzliche, periodische Längsbewegung und der durch den Seegang induzierten Zusatzgeschwindigkeit durch schrittweise Integration im Zeitbereich gelöst. (65) ist die Bewegungsgleichung, nach der die Längsbewegung im Seegang simuliert wird.

$$AA\dot{\xi} + BB\dot{\xi}^2 + CC \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x_c - \epsilon\right) + \ddot{\xi} = 0 \quad (65)$$

Die Koeffizienten  $AA$ ,  $BB$  und  $CC$  werden nach (66) bis (68) bestimmt.  $\epsilon$  ist der Phasenwinkel,  $x_c$  die Lage des Wellenberges relativ zum Hauptspant,  $\lambda$  die Wellenlänge,  $\dot{\xi}$  die zusätzliche Geschwindigkeit des Schiffes durch die Wellen und  $\ddot{\xi}$  Beschleunigung des Schiffes in Längsrichtung.  $R(v_0)$  ist der Widerstand bei der Glattwassergeschwindigkeit  $v_0$ .  $\Delta R_A$  ist die Widerstandsänderung bedingt durch die Welle.

$$AA = \frac{R(v_0)}{m} \frac{2}{v_0} \quad (66)$$

$$BB = \frac{R(v_0)}{m} \frac{1}{v_0^2} \quad (67)$$

$$CC = \frac{\Delta R_A}{m} \quad (68)$$

Die von Blume angenommene Bewegungsgleichung für den Rollwinkel ist (69).

$$\ddot{\varphi} + D_1\dot{\varphi} + D_2\dot{\varphi}^2 + E h(\varphi, x_c, v) - F \cos \varphi = 0 \quad (69)$$

Darin sind  $D_1$  der Koeffizient für die lineare Rolldämpfung,  $D_2$  der Koeffizient für die quadratische Rolldämpfung,  $F$  ist der Koeffizient für ein statisches krängendes Moment.  $E = (g + \ddot{z}(x_c))/ii^2$  ist der Koeffizient des Rückstellgliedes. Dieses enthält mit  $\ddot{z}(x_c)$ , der Vertikalbeschleunigung des Gewichtsschwerpunktes, die Kopplung mit der Tauchbewegung.

Hierfür wurden mit Hilfe der Streifenmethode die Übertragungsfunktionen für die Tauch- und Stampfbewegung berechnet und daraus die Vertikalbeschleunigung am Ort des Gewichtsschwerpunktes nach Größe und Phasenlage bestimmt. Der Trägheitsradius für das Rollen ist  $ii$ .

Der aufrichtende Hebelarm  $h(\varphi, x_c, v)$  wird als Funktion des Rollwinkels  $\varphi$ , der Lage von  $x_c$  und der momentanen Geschwindigkeit berücksichtigt. Die Hebelarme des aufrichtenden Momentes werden hydrostatisch für die Wellenberg-, die Wellental- und sechs weitere Relativlagen zu einer Trochoidenwelle mit einer Wellenlänge, die gleich der Schiffslänge ist und deren Wellenhöhe  $1/15$  der Wellenlänge ist, berechnet. Für die jeweiligen Trimmwinkel werden nicht die sich hydrostatisch einstellenden Winkel gewählt, sondern Trimmwinkel, die sich aufgrund der Berechnungen nach der Streifenmethode ergeben.

Der Geschwindigkeitseinfluß auf die Hebelarme wird von Blume näherungsweise erfaßt, indem er Hebelarmberechnungen jeweils für vier verschiedene, der Trochoidenwelle überlagerte Fahrtwellensysteme durchgeföhrt. In Anlehnung an [23] und Wellenfotos vom Modell

wurde das Wellenprofil als Polynom in Abhängigkeit von der Froudezahl dargestellt. Aus dem Datensatz für die Hebelarme, die für sechs Winkel im Bereich von  $0^\circ$  bis  $60^\circ$ , für acht Relativlagen  $x_c/L$  und vier Froudezahlen berechnet wurden, wird während der Simulation der aktuelle Wert interpoliert.

## 5 Eigene Simulationsmethode

### 5.1 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Rollbewegung eines Schiffes im unregelmäßigen, stationären, kurzkämmigen Seegang zu simulieren, d.h. die Zeitfunktion  $\varphi(t)$  ausgehend von einem Anfangszustand zu berechnen. Dabei werden lineare Kopplungen mit der Quer- und Gierbewegung und nichtlineare Kopplungen mit der Tauch- und Stampfbewegung über das erregende Seegangsmoment vereinfacht erfaßt. Die Kopplung mit der Längsbewegung kann wahlweise berücksichtigt werden.

### 5.2 Koordinatensysteme

Es werden ein schiffsfestes und ein raumfestes Koordinatensystem betrachtet. Dieses ist in Abbildung 1 dargestellt.

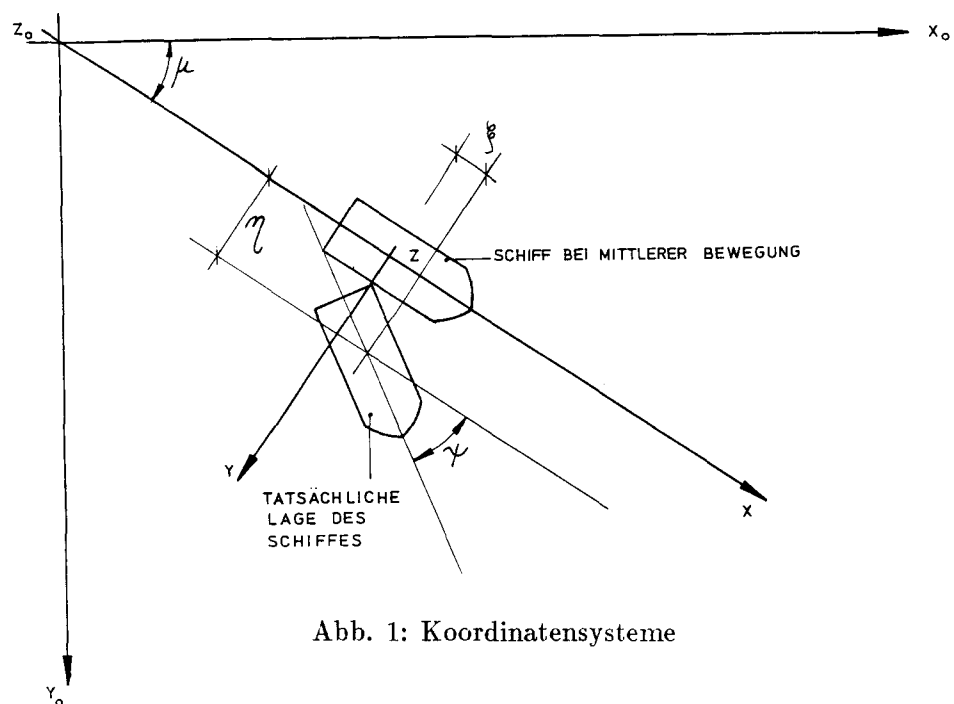


Abb. 1: Koordinatensysteme

#### 5.2.1 Schiffsfestes Koordinatensystem

$x$ -Achse	vom Hauptspant aus gemessen, parallel zum Kiel, positiv nach vorn
$y$ -Achse	von Mitte Schiff aus gemessen, parallel zu den Decks, positiv nach Steuerbord
$z$ -Achse	von der Glattwasseroberfläche aus gemessen, senkrecht zu den Decks, positiv nach unten
$\vartheta$	Stampfwinkel: positiv, wenn der Bug im Mittel weniger tief als das Heck eintaucht
$\varphi$	Rollwinkel: positiv, wenn die Steuerbordseite tiefer eintaucht

$\psi$  Gierwinkel: positiv, wenn der Bug von der mittleren Fahrtrichtung nach Steuerbord abweicht.

### 5.2.2 Raumfestes Koordinatensystem

$x_0$ -Achse positiv in Richtung der Wellenfortschrittsrichtung  
 $y_0$ -Achse um  $90^\circ$  (von oben gesehen rechts herum) gegenüber der  $x$ -Achse gedreht  
 $z_0$ -Achse von der ungestörten Wasseroberfläche aus positiv nach unten

Die weiteren Bezeichnungen in Abbildung 1 bedeuten:

$\mu$  Begegnungswinkel zwischen Schiffskurs und Wellenfortschrittsrichtung  
 $\xi$  Verschiebung des Schiffes in  $x$ -Richtung, die der mittleren Bewegung überlagert ist  
 $\eta$  Verschiebung des Schiffes in  $y$ -Richtung

Die Verschiebungen  $\xi$  und  $\eta$  resultieren aus dem Seegang.

### 5.3 Lösungsmethode

Diese Aufgabenstellung wird mit Hilfe einer Methodik, die von Söding [16] für die Simulation kontinuierlicher stochastischer Prozesse entwickelt wurde, gelöst. In Abbildung 2 wird diese Methodik schematisch dargestellt. Diese allgemein anwendbare Methodik wird hier für die Rollsimulation angewendet.

Diese Methodik ermöglicht die Kombination eines gegebenen Erregungsprozesses ( $z_1(t)$ ) mit linear von der Erregung abhängigen Antwortspektren  $z_k$  ( $z_k(t)$ ,  $k = 2, \dots, NZ$ ) und nichtlinearen Antworten  $x_l$  ( $x_l(t)$ ,  $l = 1, \dots, NX$ ) bzw.  $y_m$  ( $y_m(t)$ ,  $m = 1, \dots, NY$ ).

Die Definition der  $z_k(t)$  erfolgt durch (70) und (71), mit der Zeit  $t$  und den Frequenzen  $\omega_j$ ; für die Rollsimulation sind es die Begegnungsfrequenzen der Seegangskomponenten, aus denen der natürliche Seegang überlagert wird.

$$z_1(t) = \sum_{j=1}^{NOM} Re \left[ \hat{z}_j \cdot e^{i\omega_{ej}t} \right] \quad (70)$$

Hierin sind  $\hat{z}_j$  die komplexen Amplituden und  $NOM$  die Anzahl der Seegangskomponenten.

$$z_k(t) = \sum_{j=1}^{NOM} Re \left[ \hat{Y}_{k,j} \cdot \hat{z}_j \cdot e^{i\omega_{ej}t} \right]; \quad k = 2, \dots, NZ \quad (71)$$

Hier sind  $\hat{Y}_{k,j}$  die komplexen Übertragungsfunktionen und  $NZ$  die Anzahl der Z-Prozesse.

Zur Berechnung der Funktionen  $z_k$ ,  $x_l$  und  $y_m$  ist es erforderlich, zur Zeit  $t$  die Werte der korrelierten Prozesse  $z_k$ ,  $k = 1, \dots, NZ$  zu berechnen. Der erste Prozeß ( $k = 1$ ) wird durch Addition von  $NOM$  harmonischen Schwingungen mit den komplexen Amplituden  $\hat{Y}_{1,j}$  definiert. Die weiteren Prozesse  $z_k$ ,  $k = 2, \dots, NZ$  werden aus  $z_1$  durch die komplexen Übertragungsfunktionen  $\hat{Y}_{k,j}$ ,  $k = 2, \dots, NZ$ ;  $j = 1, \dots, NOM$  gebildet.

Im Falle der in diesem Simulationsmodell möglichen Berücksichtigung der Längsbewegung werden die komplexen Amplituden der Seegangskomponenten mit dem Faktor

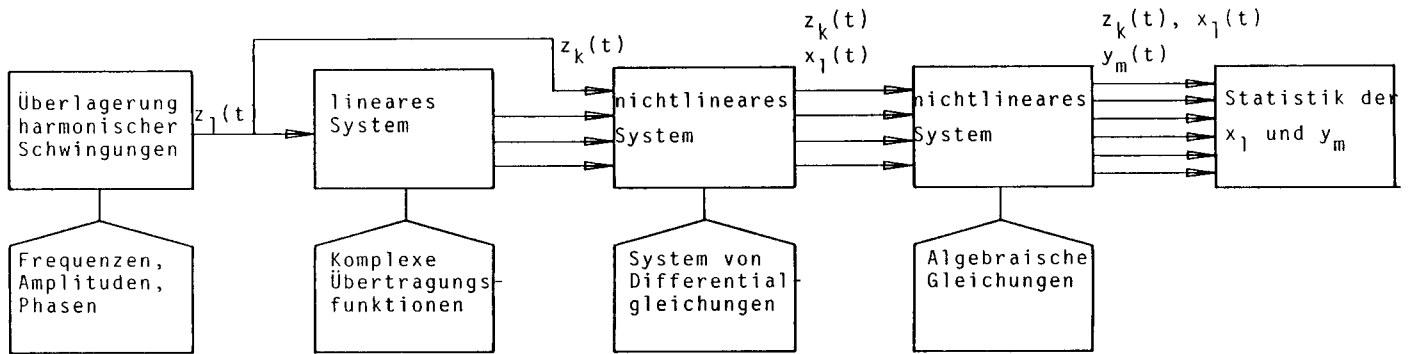


Abb. 2: Methodik zur Simulation kontinuierlicher stochastischer Prozesse

$e^{-ik_j \cos \mu_j \xi}$  multipliziert, der die Verschiebung der Wellen relativ zum Schiff berücksichtigt. Hierin sind:  $k_j$  die Wellenzahl,  $\mu_j$  der Begegnungswinkel des Schiffes mit den Wellen und  $\xi$  der dem Schiffsweg ( $v_0 \cdot t$ ) überlagerte Zusatzweg. Dann gilt statt der Beziehung (70) für den Erregerprozeß die Beziehung (72). Es wird näherungsweise angenommen, daß die für regelmäßige Wellen berechneten Übertragungsfunktionen auch für die jetzt zeitabhängige Geschwindigkeit gelten.

$$z_1(t) = \sum_{j=1}^{NOM} \operatorname{Re} \left[ \hat{z}_j \cdot e^{i\omega_{ej}t} \cdot e^{-ik_j \cos \mu_j \xi} \right] \quad (72)$$

Die Differentialgleichungen zur Definition der  $x_l(t)$  werden durch die Beziehungen (73) definiert;  $NX$  ist die Anzahl der  $x$ -Prozesse.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= f_1(x_1(t), \dots, x_{NX}(t), z_1(t), \dots, z_{NZ}(t), t) \\ &\vdots \\ \dot{x}_{NX}(t) &= f_{NX}(x_1(t), \dots, x_{NX}(t), z_1(t), \dots, z_{NZ}(t), t) \end{aligned} \quad (73)$$

Die  $y_n(t)$  werden durch algebraische Gleichungen der Form (74) beschrieben.

$$y_m(t) = g_m(x_1(t), \dots, x_{NX}(t), z_1(t), \dots, z_{NZ}(t), t) \quad (74)$$

Hierin bezeichnet  $NX$  die Anzahl der  $X$ -Prozesse und  $NZ$  die Anzahl der  $Z$ -Prozesse.

Die Differentialgleichungen werden numerisch durch Integration mittels des Runge-Kutta-Verfahrens vierter Ordnung mit fester, vorzugebender Schrittweite gelöst.

Ein stochastischer Seegang wird bei dieser Simulationsmethode durch das Überlagern von regelmäßigen Seegangskomponenten mit zufälligen und gleichverteilten Phasen angenähert. Die Frequenzen und Laufrichtungen der Seegangskomponenten werden ebenfalls zufällig in einem vorzugebenden Winkelbereich bzw. einem Frequenzbereich verteilt.

Die einzelnen Prozesse bedeuten das Folgende:

$z_1$  Wellensenkung am Hauptspant unter dem mittleren Wasserspiegel

Als linear von der Erregung abhängige Prozesse  $z$  werden angesetzt:

$z_2$  Tauchbewegung des Schiffes am Hauptspant

$z_3$  Tauchbeschleunigung des Schiffes am Hauptspant

$z_4$  Stampfwinkel des Schiffes

$z_5$  Stampfbeschleunigung des Schiffes

$z_6$  Querbeschleunigung des Schiffes

$z_7$  Gierbeschleunigung des Schiffes

$z_8$  Erregendes Rollmoment durch das Wasser

$z_9$  Amplitude der mittleren Senkung der Ersatzwelle im Bereich der Schiffslänge

$z_{10}$  Amplitude der mittleren Wasserspiegelneigung der Ersatzwelle um die Querachse

$z_{11}$  Komplexe Amplitude der Ersatzwelle mit Wellenberg bzw. Wellental am Hauptspant des Schiffes.

Die Größen  $z_2$  bis  $z_8$  werden mit der Streifenmethode berechnet,  $z_9$  bis  $z_{11}$  werden im Abschnitt über die Ersatzwelle erklärt.

Die nichtlinearen Prozesse  $x_i(t)$  beschreiben das Folgende:

$x_1$  Rollwinkel

$x_2$  Rollwinkelgeschwindigkeit

$x_3$  Längsverschiebung des schiffsfesten Koordinatensystems im Inertialsystem

$x_4$  Seegangsinduzierte Zusatzgeschwindigkeit

Der nichtlineare Prozeß  $y(t)$  beschreibt die Beschleunigung parallel zum Deck in Schiffsquerrichtung.

#### 5.4 Darstellung des unregelmäßigen Seeganges durch regelmäßige Seegangskomponenten

Der natürliche Seegang wird durch die Überlagerung von regelmäßigen Seegangskomponenten mit verschiedenen Perioden und Laufrichtungen angenähert. Die Phasenbeziehungen zwischen diesen regelmäßigen Seegangskomponenten ändern sich mit der Zeit und dem Ort und werden für den Koordinatenursprung zur Zeit  $t = 0$  als zufällige Größen angenommen. Die Zufälligkeit dieser Phasen entspricht der Zufälligkeit des unregelmäßigen Seeganges.

Für natürliche Seegänge sind Energiespektren aufgenommen worden. Für das erstellte Simulationsprogramm stehen drei Seegangsspektren zur Auswahl. Diese sind das

JONSWAP-, das Wallops- und das Pierson-Moskowitz-Spektrum. Der unregelmäßige Seegang wird durch drei Parameter definiert; die kennzeichnende Wellenhöhe  $H_{1/3}$ , die kennzeichnende Periode  $T_1$  und die Laufrichtung  $\mu$ . Als kennzeichnende (signifikante) Wellenhöhe wird der Mittelwert der Höhe (gemessen von Berg bis Tal) des größten Drittels aller Wellen betrachtet. Die kennzeichnende Periode  $T_1$  wird zu  $2\pi/\omega_s$  definiert, wobei  $\omega_s$  der  $\omega$ -Wert des Schwerpunktes der Fläche unter dem Spektrum ist.

Die Seegangsspektren beschreiben die Verteilung der Wellenenergie auf die einzelnen Wellenkreisfrequenzen und die Laufrichtungen.

In (78) bis (80) dient die Funktion  $F(\mu)$  der Berücksichtigung der Winkelverteilung der Seegangskomponenten, die nach einer  $\cos^2$ -Funktion erfolgt.

$$F(\mu) = AI \cos^2 \left( \frac{\mu\pi}{\mu_B} \right) \quad (75)$$

Um die Energie des Spektrums konstant zu halten, muß die Integration der Funktion  $F(\mu)$  in den Grenzen von  $-\frac{\mu_B}{2} \leq \mu \leq +\frac{\mu_B}{2}$  den Wert Eins ergeben.  $\mu_B$  ist der zulässige Bereich für die Begegnungswinkelstreuung.

$$\frac{\mu_B AI}{\pi} \int_{-\frac{\mu_B}{2}}^{\frac{\mu_B}{2}} \cos^2 \left( \frac{\mu\pi}{\mu_B} \right) \frac{\pi}{\mu_B} d\mu = 1 \quad (76)$$

Nach Ausführung dieser Integration ergibt sich für  $AI = 2/\mu_B$  und die Verteilungsfunktion  $F(\mu)$  wird zu (77).

$$F(\mu) = \frac{2}{\mu_B} \cos^2 \left( \frac{\mu\pi}{\mu_B} \right) \quad (77)$$

Söding [24] empfiehlt zur Berechnung der maximalen Seegangsbelastungen das JONSWAP-Spektrum, weil starker Seegang erfahrungsgemäß dieser Spektralform sehr nahe kommt. Dieses Spektrum wird von Richter [25] auf der Basis der von Hasselmann [26], [27] veröffentlichten Ergebnisse beschrieben. (78) stellt die Gleichung dieses Spektrums dar.

$$S(\omega, \mu) = H_{1/3}^2 T_1 \frac{156}{(T_1 \omega)^5} e^{-1.25 \frac{\omega_m^4}{\omega^4}} \gamma \exp \left( -\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2b^2 \omega_m^2} \right) F(\mu) \quad (78)$$

Hierin sind:

- $\omega_m$  Kreisfrequenz, bei der das Spektrum maximal ist.  
( $\omega_m = 5.25/T_1$ )
- $\gamma$  Spitzenüberhöhungsfaktor; empfohlen wird der Mittelwert der Messungen:  $\gamma = 3.3$
- $b$  Spitzenbreite; empfohlen wird der Mittelwert aus Messungen:  $b = 0.07$  für  $\omega < \omega_m$  und  $b = 0.09$  für  $\omega > \omega_m$

Für die Bestimmung von Lastverteilungen für Betriebsfestigkeitsuntersuchungen spielen auch die häufigeren, schwächeren Seegänge eine Rolle. Dabei kommt oft eine Überlagerung der Windsee mit höheren Kreisfrequenzen und einer Dünung mit niedrigeren Kreisfrequenzen vor. Dies führt zu breiteren oder zweigipfligen Spektren. Gleichung (79) beschreibt mit dem Pierson-Moskowitz-Spektrum ein solches breites Spektrum.

$$S(\omega, \mu) = H_{1/3}^2 T_1 \frac{171}{(T_1 \omega)^5} e^{-\frac{685}{T_1^4 \omega^4}} F(\mu) \quad (79)$$

Die tatsächlich auftretenden Seegangsspektren sind in der Regel schmaler. Das Wallopspektrum ( 80) ist ein solches schmales Spektrum.

$$S(\omega, \mu) = \alpha g^2 \omega_m^{n-5} \omega^{-n} e^{-\frac{n}{4}(\frac{\omega_m}{\omega})^4} F(\mu) \quad (80)$$

$\omega_m$  ist die Kreisfrequenz des Maximums,  $g$  die Erdbeschleunigung. Der Faktor  $\alpha$  und die Größe  $n$  können [28] entnommen werden. Im Simulationsprogramm werden für  $\alpha$  und  $n$  von Söding [16] vorgeschlagene Näherungen angenommen. Dies wird in den Beziehungen ( 81) bis ( 83) dargestellt.

$$\alpha \approx 0.885p + 2.280p^{1.5} - 3.101p^2 \quad (81)$$

hierin kennzeichnet  $p$  die Steilheit.

$$p = 0.25H_{1/3} \frac{\omega_m^2}{g} \quad (82)$$

$$n \approx -\frac{2}{\ln 2} \ln \frac{p}{\sqrt{2}} \quad (83)$$

Der den folgenden Simulationen zugrunde liegende Seegang wird aus Seegangskomponenten, deren Amplituden aus einem der Spektren berechnet werden, dargestellt. Die Auswahl der Einzelkomponenten erfolgt nach Vorgabe einer Hauptlaufrichtung  $\mu_H$ , um die die Begegnungswinkel  $\mu$  im Bereich von

$$\mu_H - \mu_B/2 \leq \mu \leq \mu_H + \mu_B/2$$

als zufällig gleichverteilt (entsprechend  $F(\mu)$  angenommen werden.

Desweiteren wird eine vorherrschende Frequenz  $\omega_H$  und ein Frequenzbereich

$$\omega_{min} \omega_H \leq \omega \leq \omega_{max} \omega_H$$

mit Faktoren  $\omega_{min}$  und  $\omega_{max}$ , mit denen die vorherrschende Frequenz  $\omega_H$  multipliziert wird, um das Minimum bzw. Maximum des Frequenzbereiches zu erhalten. Die Frequenzen werden in dem so definierten Bereich ebenfalls zufällig gleichmäßig verteilt.

Für die im Anhang C aufgelisteten Rechenprogramme wird diese Zufälligkeit durch Berücksichtigung eines Faktors, der zwischen Null und Eins liegt und der von einem Zufallszahlengenerator ermittelt wird, erfaßt.

Der Real- bzw. Imaginärteil der komplexen Amplitude einer Seegangskomponente  $n$  errechnet sich nach ( 84) und ( 85).

$$Re(\zeta_n) = \sqrt{2S(\omega_n, \mu_n) \Delta\omega_n \Delta\mu_n} \cos \epsilon_n \quad (84)$$

$$Im(\zeta_n) = -\sqrt{2S(\omega_n, \mu_n) \Delta\omega_n \Delta\mu_n} \sin \epsilon_n \quad (85)$$

In diesen Beziehungen ist  $\Delta\omega_n$  das Frequenzintervall (Frequenzbereich/Anzahl der Frequenzen),  $\Delta\mu_n$  das Laufrichtungsintervall (Begegnungswinkelbereich/Anzahl der Winkel) und  $\epsilon_n$  die Phase.

## 5.5 Äquivalente Welle

Die *äquivalente* Welle wird im folgenden zunächst für den Fall beschrieben, daß eine seegangsinduzierte Längsbewegung nicht berücksichtigt wird. Die Wasserspiegelhöhe, abhängig von der Zeit  $t$  und der Längenkoordinate  $x$  ist durch die Beziehung (86) gegeben, mit  $x$  der Koordinate vom Hauptspant aus gemessen.

$$\zeta(x, t) = \sum_{n=1}^{NOM} Re \left[ \hat{\zeta}_n \cdot e^{i(\omega_{en}t - k_n x \cos \mu_n)} \right] \quad (86)$$

Die bei der Simulation berücksichtigten Hebelarme des aufrichtenden Moments werden hydrostatisch berechnet. Die Hebelarme sind stark nichtlinear von der Form der Wasseroberfläche am Schiff abhängig; deshalb sind die Hebel nicht als Summe der Hebelarmänderungen von regelmäßigen Seegangskomponenten berechenbar. Aus diesem Grunde wird die aktuelle Wasserlinie durch eine für die Hebel ähnlich wirkende, über  $x$  regelmäßige, über  $t$  stochastisch schwankende Wasserlinie angenähert. Die wirkliche Wasserlinie wird zu jedem Zeitpunkt im Längenbereich des Schiffes durch die Summe aus einer linearen Funktion von  $x$  und einer Cosinuswelle, deren Wellenberg oder -tal am Hauptspant des Schiffes liegt, angenähert. Die Konstanten  $\hat{a}_n$  und  $\hat{b}_n$  der linearen Funktionen und die Amplituden  $\hat{c}_n$  der Cosinuswellen schwanken stochastisch über der Zeit.

Diese *äquivalente* Welle, die etwa den gleichen Einfluß auf die Hebelarme hat wie die nach (86) bestimmte Wasserspiegelhöhe, wird durch (87) beschrieben; mit der Begegnungsfrequenz  $\omega_{en}$  des Schiffes mit der Welle  $n$ .

$$\zeta_a(x, t) = \sum_{n=1}^{NOM} Re \left[ \left( \hat{a}_n + \hat{b}_n x + \hat{c}_n \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} x \right) \right) \cdot e^{i\omega_{en}t} \right] \quad (87)$$

Diese *äquivalente* Welle nähert die wirkliche Wasserspiegelhöhe besser an, als die effektive Welle, die in [19] eingeführt und im Abschnitt über bestehende Simulationsverfahren beschrieben wurde. Jeder Summand in (87) nähert einen entsprechenden Summanden in (86) an.

In (87) bezeichnet  $\hat{a}_n$  die komplexe Amplitude der mittleren Senkung des Wasserspiegels infolge der regelmäßigen Seegangskomponenten,  $\hat{b}_n$  die komplexe Amplitude der mittleren Wasserspiegelneigung um die Querachse (positive  $\hat{b}_n$  bedeuten, daß das Schiff vorn weniger tief eintaucht),  $\hat{c}_n$  ist die komplexe Amplitude einer Welle der Länge  $\lambda$ , mit Wellenberg bzw. Wellental am Hauptspant. Die  $\hat{a}_n$ ,  $\hat{b}_n$  und  $\hat{c}_n$  werden aus der Bedingung der kleinsten quadratischen Abweichungen zwischen  $\zeta(x, t)$  und  $\zeta_a(x, t)$  im Bereich der Schiffslänge bestimmt (88).

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} (\zeta(x, t) - \zeta_a(x, t))^2 dx \longrightarrow Min! \quad (88)$$

Aus Symmetriegründen wird  $\hat{a}_n/\hat{\zeta}_n$  reell,  $\hat{b}_n/\hat{\zeta}_n$  imaginär und  $\hat{c}_n/\hat{\zeta}_n$  reell. Deshalb werden die Beziehungen (89) angenommen.

$$a_n = \hat{a}_n/\hat{\zeta}_n; \quad b_n = -i\hat{b}_n/\hat{\zeta}_n; \quad c_n = \hat{c}_n/\hat{\zeta}_n \quad (89)$$

Mit diesen Ansätzen wird ( 87) zu ( 90)

$$\zeta_a(x, t) = \sum_{n=1}^{NOM} Re \left[ \hat{\zeta}_n \left( a_n + ib_n + c_n \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right) e^{i\omega_n t} \right] \quad (90)$$

Aus ( 88) folgt, daß die partiellen Ableitungen von ( 88) nach  $a_m$ ,  $b_m$  und  $c_m$  für  $m = 1, \dots, NOM$  gleich Null werden müssen.

( 91) ist die Ableitung nach  $a_m$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_m} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \left\{ \sum_{n=1}^{NOM} Re \left[ \hat{\zeta}_n \cdot e^{i\omega_n t} \cdot e^{-ik_n x \cos \mu_n} \right] \right. \\ \left. - \sum_{n=1}^{NOM} Re \left[ \hat{\zeta}_n \left( a_n + ib_n x + c_n \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right) e^{i\omega_n t} \right] \right\}^2 dx = 0 \end{aligned} \quad (91)$$

Entsprechende Gleichungen können für die partiellen Ableitungen  $\partial/\partial b_m$  und  $\partial/\partial c_m$  aufgestellt werden.

Die Imaginärteile der Klammerinhalte von  $\partial/\partial a_m$  und  $\partial/\partial c_m$  werden aufgrund der Symmetrie zu Null, während der Realteil der Ableitung  $\partial/\partial b_m$  wegen der Antimetrie zu Null wird.

Nach Durchführen der Differentiation und Zusammenfassung ergeben sich ( 92) bis ( 94). Bezüglich der Integration sind  $\cos \mu_n$  Konstanten.

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \left[ \cos(k_n x \cos \mu_n) - a_n - c_n \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right] dx = 0, \quad n = 1, \dots, NOM \quad (92)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} [-\sin(k_n x \cos \mu_n) - b_n x] x dx = 0, \quad n = 1, \dots, NOM \quad (93)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \left[ \cos(k_n x \cos \mu_n) - a_n - c_n \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right] \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) dx = 0, \quad n = 1, \dots, NOM \quad (94)$$

Die Gleichungen ( 92) und ( 94) können als ( 95) geschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} 1 dx & \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) dx \\ \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) dx & \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \cos^2 \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) dx \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \cos(k_n x \cos \mu_n) dx \\ \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \cos(k_n x \cos \mu_n) \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) dx \end{bmatrix} \quad (95)$$

Berechnung der Integrale aus ( 95)

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} 1 dx = L$$

$$\begin{aligned}
\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) dx &= \frac{\lambda}{\pi} \sin\left(\frac{\pi L}{\lambda}\right) \\
\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \cos(k_n x \cos \mu_n) dx &= 2 \int_0^{+\frac{L}{2}} \cos(k_n x \cos \mu_n) dx = \frac{2}{k_n \cos \mu_n} \sin\left(\frac{k_n L \cos \mu_n}{2}\right) \\
\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \cos^2\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) dx &= 2 \int_0^{+\frac{L}{2}} \cos^2\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) dx = \frac{L}{2} + \frac{\lambda}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right) \\
\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \cos(k_n x \cos \mu_n) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) dx &= 2 \int_0^{+\frac{L}{2}} \cos(k_n x \cos \mu_n) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) dx \\
&= \frac{\sin\left[\left(k_n \cos \mu_n - \frac{2\pi}{\lambda}\right) \frac{L}{2}\right]}{k_n \cos \mu_n - \frac{2\pi}{\lambda}} + \frac{\sin\left[\left(k_n \cos \mu_n + \frac{2\pi}{\lambda}\right) \frac{L}{2}\right]}{k_n \cos \mu_n + \frac{2\pi}{\lambda}}
\end{aligned}$$

Zur Vereinfachung werden die Kürzel ( 96) und ( 97) und die Beziehung  $f(w) = \sin(w)/w$  eingeführt.

$$s = \frac{\pi L}{\lambda} \quad (96)$$

$$r_n = \frac{k_n L}{2} \cos \mu_n \quad (97)$$

Damit folgt für die vorstehenden Integrale

$$\begin{aligned}
\frac{\lambda}{\pi} \sin\left(\frac{\pi L}{\lambda}\right) &= \frac{L}{s} \sin s = L f(s) \\
\frac{2}{k_n \cos \mu_n} \sin\left(\frac{k_n L \cos \mu_n}{2}\right) &= \frac{L}{r_n} \sin r_n = L f(r_n) \\
\frac{L}{2} + \frac{\lambda}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right) &= \frac{L}{2} + \frac{L}{4s} \sin(2s) = \frac{L}{2} (1 + f(2s)) \\
\frac{\sin\left[\left(k_n \cos \mu_n - \frac{2\pi}{\lambda}\right) \frac{L}{2}\right]}{k_n \cos \mu_n - \frac{2\pi}{\lambda}} + \frac{\sin\left[\left(k_n \cos \mu_n + \frac{2\pi}{\lambda}\right) \frac{L}{2}\right]}{k_n \cos \mu_n + \frac{2\pi}{\lambda}} \\
&= \frac{L}{2} \left[ \frac{\sin(r_n - s)}{r_n - s} \right] + \frac{L}{2} \left[ \frac{\sin(r_n + s)}{r_n + s} \right]
\end{aligned}$$

Mit diesen Beziehungen wird aus ( 95) nach Herauskürzen der Schiffslänge ( 98)

$$\begin{bmatrix} 1 & f(s) \\ f(s) & \frac{1}{2}(1 + f(2s)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(r_n) \\ \frac{1}{2}f(r_n - s) + \frac{1}{2}f(r_n + s) \end{bmatrix} \quad (98)$$

Nach Auflösen der Matrixgleichung ( 98) ergeben sich ( 99) und ( 100)

$$a_n = \frac{f(r_n)[1 + f(2s)] - [f(r_n - s) + f(r_n + s)]f(s)}{1 + f(2s) - 2f(s)^2} \quad (99)$$

$$c_n = \frac{f(r_n - s) + f(r_n + s) - 2f(r_n)f(s)}{1 + f(2s) - 2f(s)^2} \quad (100)$$

Die Größen  $b_n$  werden aus ( 93) bestimmt.

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} [-\sin(k_n x \cos \mu_n)] x dx = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} b_n x^2 dx \quad (101)$$

Die Lösung der Integrale aus ( 101) ergibt

$$\begin{aligned} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} [\sin(k_n x \cos \mu_n)] x dx &= \frac{2 \sin\left(k_n \frac{L}{2} \cos \mu_n\right)}{k_n^2 \cos^2 \mu_n} - \frac{L \cos\left(k_n \frac{L}{2} \cos \mu_n\right)}{k_n \cos \mu_n} \\ \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} b_n x^2 dx &= \frac{1}{12} L^3 b_n \end{aligned}$$

Nach Einsetzen der Kürzel ( 97) folgt ( 102)

$$b_n = \frac{6}{L} \left[ \frac{\cos r_n}{r_n} - \frac{\sin r_n}{r_n^2} \right] \quad (102)$$

Bei der Berücksichtigung der Längsbewegung werden durch die Verschiebung des Schiffes um  $\xi$  die bisher benutzten komplexen Amplituden des Seeganges am Hauptspant  $\hat{\zeta}_n$  verschieden von den in ( 86) berücksichtigten Amplitudenwerten, die auf den Ursprung des Inertialsystems bezogen sind. Mit  $\tilde{x}$  der Koordinate in Richtung des mittleren Kurswinkels des Schiffes ab Inertialsystem und  $x$  der Koordinate ab Hauptspant ergibt sich ( 103).

$$\tilde{x} = x + \xi \quad (103)$$

Die komplexen Amplituden des Seeganges am Hauptspant errechnen sich im Falle einer Verschiebung des Schiffes um  $\xi$  zu ( 104).

$$\tilde{\zeta}_n = \hat{\zeta}_n e^{-ik_n \xi \cos \mu_n} \quad (104)$$

Damit werden bei Berücksichtigung der Längsbewegung aus ( 86) die Beziehungen ( 105)

$$\begin{aligned} \zeta(x, t) &= \sum_{n=1}^{NOM} \operatorname{Re} \left[ \hat{\zeta}_n e^{i(\omega_n t - k_n \tilde{x} \cos \mu_n)} \right] \\ \zeta(x, t) &= \sum_{n=1}^{NOM} \operatorname{Re} \left[ \tilde{\zeta}_n e^{i(\omega_n t - k_n x \cos \mu_n)} \right] \\ \zeta(x, t) &= \sum_{n=1}^{NOM} \operatorname{Re} \left[ \tilde{\zeta}_n e^{ik_n \xi \cos \mu_n} \cdot e^{i(\omega_n t - k_n \tilde{x} \cos \mu_n)} \right] \end{aligned} \quad (105)$$

Da in ( 87) die  $x$ -Koordinate ab Hauptspant gemessen wird, werden  $\hat{a}_n$ ,  $\hat{b}_n$  und  $\hat{c}_n$  bei Berücksichtigung der seegangsbedingten Längsbewegung zu ( 106) bis ( 108).

$$\hat{a}_n = \tilde{\zeta}_n a_n = \hat{\zeta}_n e^{-ik_n \xi \cos \mu_n} a_n \quad (106)$$

$$\hat{b}_n = \tilde{\zeta}_n b_n = \hat{\zeta}_n e^{-ik_n \xi \cos \mu_n} b_n \quad (107)$$

$$\hat{c}_n = \tilde{\zeta}_n c_n = \hat{\zeta}_n e^{-ik_n \xi \cos \mu_n} c_n \quad (108)$$

## 5.6 Bewegungsgleichungen

Die Rollbewegung wird nach der von Söding in [16] vorgeschlagenen nichtlinearen Bewegungsgleichung ( 109) simuliert.

$$\Theta_x \ddot{\varphi} + d_L \dot{\varphi} + d_Q \varphi |\dot{\varphi}| + AR = M + MW \quad (109)$$

Hierin sind:

- $\Theta_x$  Trägheitsmoment des Schiffes um die  $x$ -Achse
- $d_L$  lineare Rolldämpfungskonstante auf die  $x$ -Achse bezogen
- $d_Q$  quadratische Rolldämpfungskonstante auf die  $x$ -Achse bezogen
- $M$  Nach der Streifenmethode berechnetes Moment um die  $x$ -Achse infolge der Wellen und infolge der Quer- und Gierbewegung des Schiffes
- $MW$  Moment durch seitlichen Winddruck oder anderes krängendes Moment
- $AR$  Rückstellmoment ( 110)

$$AR = \int_L (g - \ddot{z} - x\ddot{\vartheta}) (\rho A(x)w(x) - \mu(x)\overline{KG}(x) \sin \varphi) dx \quad (110)$$

Hierin sind:

- $\ddot{z}$  nach der Streifenmethode berechnete Vertikalbeschleunigung am Hauptspant
- $\ddot{\vartheta}$  nach der Streifenmethode berechnete Stampfwinkelbeschleunigung
- $\rho$  Flüssigkeitsdichte
- $x$  Längenkoordinate
- $A(x)$  Spantfläche an der Stelle  $x$
- $w(x)$  horizontale Auslenkung (Pantokarene) des Schwerpunktes der getauchten Spantfläche an der Stelle  $x$  abhängig von der Krängung und der Tauchung des Spantes, gemessen parallel zur ruhigen Wasseroberfläche von der Kiellinie des Schiffes aus. Die Wasserlinie am Spant  $x$  wird auch in schrägen Wellen um den Krängungswinkel  $\varphi$  gegenüber der schiffsfesten Horizontalen geneigt angesetzt; das Moment durch die tatsächlich andere Neigung der Wasseroberfläche bei seitlichen oder schrägen Wellen wird durch  $M$  erfaßt. Als Höhe der Wasserlinie in der Mitschiffsebene wird die tatsächliche, durch die Bewegung des Schiffes und der Wasseroberfläche bedingte Höhe angesetzt. Das Schiffswellensystem kann im erstellten Rechenprogramm durch eine additive Größe zu dem die momentane Höhe der Ersatzwelle charakterisierenden Prozeß  $c$  berücksichtigt werden.

$\mu(x)$  Masse pro Länge des Schiffes und der Ladung an der Stelle  $x$

$\overline{KG}(x)$  Höhe des Schwerpunktes der Massenbelegung  $\mu(x)$  an der Stelle  $x$  über der Kiellinie

Die Summanden des Integranden können dargestellt werden als ( 111) bis ( 113)

$$\int_L A(x) w(x) dx = w \nabla \quad (111)$$

In ( 111) ist  $w$  die Pantokarene des Schiffes und  $\nabla$  die momentane Verdrängung.

$$\int_L \mu(x) dx = m = \rho \nabla \quad (112)$$

In ( 112) ist  $m$  die Schiffsmasse.

$$\int \mu(x) KG(x) dx = \overline{KG}_s m \quad (113)$$

$\overline{KG}_s$  ist die Gewichtsschwerpunktshöhe des Schiffes über Kiel. Werden ( 111) bis ( 113) in ( 110) eingesetzt, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} AR = (g - \ddot{z}) m \left( w - \overline{KG}_s \sin \varphi \right) &- \ddot{\vartheta} \int_L w(x) x \rho A(x) dx \\ &+ \ddot{\vartheta} \int_L \overline{KG}(x) x \mu(x) \sin \varphi dx \end{aligned} \quad (114)$$

$$w - \overline{KG}_s \sin \varphi = h(\varphi, T, tr, t) \quad (115)$$

In ( 115) bedeuten  $T$  den aktuellen Tiefgang,  $tr$  den aktuellen Trimm. ( $\varphi$ ,  $T$  und  $tr$  werden durch Simulation ermittelt)

$$\int_L \overline{KG}(x) x \mu(x) dx = \Theta_{xz} \quad (116)$$

$$\int_L w(x) x \rho A(x) dx = BR \quad (117)$$

Es wird angenommen daß  $|BR|$  im zeitlichen Mittel wesentlich kleiner als  $|\Theta_{xz} \sin \varphi|$  ist, sodaß  $BR$  vernachlässigt werden kann. Dann wird aus ( 114) mit diesen Beziehungen ( 118).

$$AR = (g - \ddot{z}) m h(\varphi, T, tr, t) + \ddot{\vartheta} \Theta_{xz} \sin \varphi \quad (118)$$

Das Deviationsmoment  $\Theta_{xz}$  wird nach Beziehung ( 119) bestimmt.

$$\Theta_{xz} = \int_L z x dm \quad (119)$$

Die Beziehung ( 118) in ( 109) eingesetzt und nach  $\ddot{\varphi}$  aufgelöst ergibt für die Rollbeschleunigung die Gleichung ( 120)

$$\ddot{\varphi} = \frac{M + MW - d_L \dot{\varphi} - d_Q \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| - (g - \ddot{z}) m h(\varphi, T, tr, t) - \ddot{\vartheta} \Theta_{xz} \sin \varphi}{\Theta_x} \quad (120)$$

## 5.7 Bestimmung der Dämpfungskonstanten

Die lineare ( $d_L$ ) und die quadratische ( $d_Q$ ) Rolldämpfungskonstante werden nach Blume [20] bestimmt. Die Rollbewegung eines Schiffes ist im Verhältnis zur Tauch- und Stampfbewegung relativ schwach gedämpft. Daher können im Resonanzfall große Rollwinkel auftreten. Das den Resonanzrollwinkel begrenzende Dämpfungsmoment wird bestimmt durch Kräfte infolge Wellenabstrahlung, durch Zähigkeitseffekte (Tangentialkräfte an der Kontur und Druckkräfte durch Wirbelablösungen) und beim fahrenden Schiff durch schräganströmungsbedingte Auftriebskräfte (Zirkulationseffekte). Die Dämpfung infolge der Wellenabstrahlung ist theoretisch berechenbar, doch ist ihr Anteil an der Gesamtdämpfung relativ klein. Der Anteil der schräganströmungsbedingten Auftriebskräfte ist nach der Streifenmethode erfassbar. Um jedoch die gesamte Rolldämpfung zu erhalten, ist es erforderlich, Modellversuche für jeden konkreten Einzelfall durchzuführen.

In der HSVA wurden von Blume [20] solche Modellversuche für drei Handelsschiffsformen bei verschiedenen Beladungszuständen durchgeführt. Für sehr kleine Fahrtgeschwindigkeiten und für die Geschwindigkeit Null wurden Ausschwingversuche durchgeführt. Hier wurde das Modell, nachdem es in Rollschwingungen versetzt wurde, sich selbst überlassen. Das Modell rollte dann mit seiner Eigenperiode und abklingender Amplitude weiter. Aus dem logarithmischen Dekrement der abklingenden Schwingung läßt sich die Dämpfung bestimmen.

An mit größeren Geschwindigkeiten fahrenden Schiffen wurde ein harmonisch schwankendes, erregendes Rollmoment mit verschiedenen Frequenzen im Bereich der Rolleigenfrequenz aufgebracht. Die sich stationär einstellenden Rollamplituden wurden gemessen. Zur Erfassung der Abhängigkeit der Dämpfung von der Rollamplitude wurden solche Resonanzkurven mit mehreren Momentenamplituden aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Diagrammform für die Modelle mit unterschiedlichen Breiten-Tiefgangs-Verhältnissen und Blockkoeffizienten abhängig von der Froudezahl und der Rollamplitude dargestellt.

### 5.7.1 Lineare Dämpfungskonstante $d_L$

Die in Gleichung ( 120) auftretende lineare Rolldämpfungskonstante hängt in folgender Weise mit den Versuchsdaten zusammen.

$$d_L = \frac{m g \overline{GM}}{\omega_\varphi} \left( \frac{\varphi_{stat}}{\varphi_{res}} \right)_{0^\circ} \quad (121)$$

Dabei ist  $\omega_\varphi$  die Rolleigenfrequenz des Schiffes und  $\overline{GM}$  die metazentrische Höhe. Der Quotient  $\varphi_{stat}/\varphi_{res}$  ist der dimensionslose Koeffizient der wirksamen Rolldämpfung nach Blume [20] , gültig für die Eigenfrequenz und linearisiert für die gemessene Rollamplitude  $\varphi_{res}$ ,  $\varphi_{stat}$  ist der statische Krängungswinkel. Dieser Quotient  $\varphi_{stat}/\varphi_{res}$  wird aus Abbildung 3, die der Veröffentlichung von Blume entnommen wurde, für verschiedene Breiten-Tiefgangs-Verhältnisse und Blockkoeffizienten abhängig von der Froudezahl für einen extrapolierten Winkel  $\varphi_{res} = 0^\circ$  abgelesen.

Abbildung 3 gilt für die Froudezahl  $F_n = 0$ , in der Veröffentlichung von Blume sind gleichartige Diagramme für  $F_n = 0.1$  und für  $F_n = 0.2$  abgedruckt.

Die Rolleigenfrequenz des Schiffes wird näherungsweise nach der Beziehung ( 122)

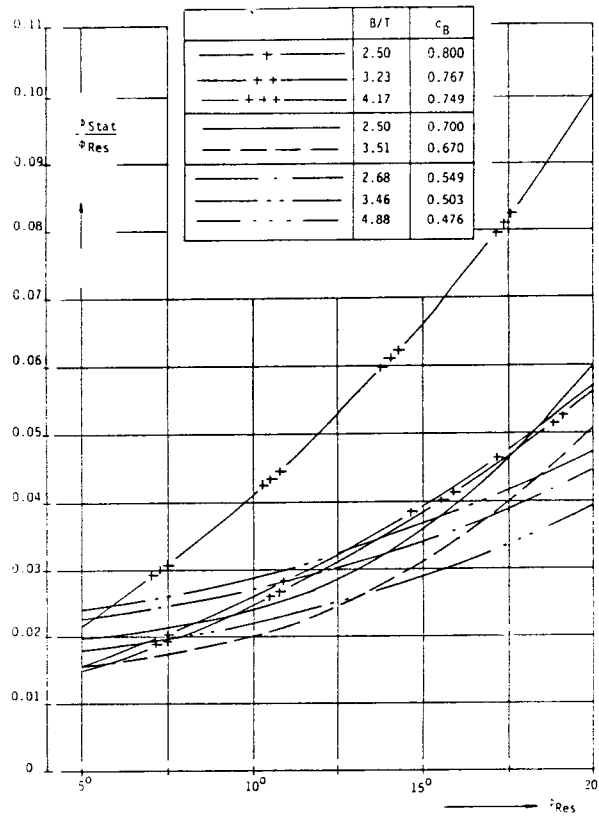


Abb. 3: Koeffizient der wirksamen Rolldämpfung

bestimmt. Hier ist  $B$  die Schiffsbreite.

$$\omega_{\varphi} = \frac{\sqrt{g \overline{GM}}}{0.38 B} \quad (122)$$

### 5.7.2 Quadratische Rolldämpfungskonstante $d_Q$

Die Bestimmung der in Gleichung (120) auftretenden, quadratisch von der Rollgeschwindigkeit abhängigen Dämpfungsmomente wird nach einem Vorschlag von Gadd [29], der auf einer Veröffentlichung von Baker [30] beruht, durchgeführt. Hierzu wird ein Resonanzrollwinkel von  $\varphi_{res} = 20^\circ$  angenommen. Eine Herleitung des hier angewandten Verfahrens findet sich in [29], [30].

Aus Abbildung 4, die der Arbeit von Blume [20] entnommen wurde, kann der Wert  $\varphi_{stat}/\varphi_{res}$  für den Resonanzrollwinkel  $\varphi_{res} = 20^\circ$  für verschiedene Breiten-Tiefgangs-Verhältnisse und Blockkoeffizienten in Abhängigkeit der Froudezahl entnommen werden.

Bei einer harmonischen Rollbewegung mit der Kreisfrequenz  $\omega_{\varphi}$  und der Amplitude  $\varphi_A$  bewirkt eine quadratische Rolldämpfung  $d_Q$  denselben Energieverlust wie die lineare Rolldämpfung mit  $d_{eff}$ . Der Koeffizient der wirksamen (äquivalenten, linearen) Dämpfungskonstanten wird zu (123).

$$d_{eff} = \frac{m g \overline{GM}}{\omega_{\varphi}} \left( \frac{\varphi_{stat}}{\varphi_{res}} \right)_{20^\circ} \quad (123)$$

Von  $d_{eff}$  ist der Linearanteil  $d_L$  zu subtrahieren, so daß (124) gilt.

$$d_{effQ} = d_{eff} - d_L \quad (124)$$

Für die Rollwinkelamplitude wird ein Wert von  $\varphi_{res} = 20^\circ$  angenommen. Somit läßt sich die quadratische Rolldämpfungskonstante  $d_{Q1}$  (ohne Schlingerkiele) bestimmen zu (125):

$$d_{Q1} = \frac{3\pi}{8\omega_{\varphi}\varphi_{res}} d_{effQ} \quad (125)$$

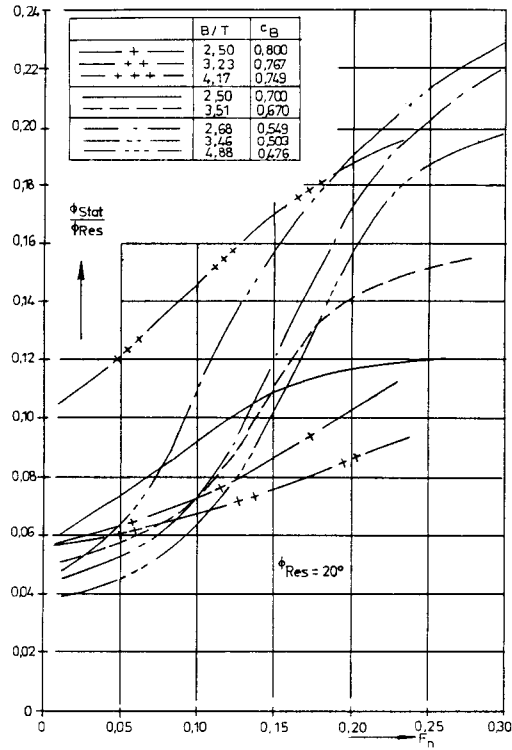


Abb. 4: Verhältnis  $\varphi_{stat}/\varphi_{res}$  ( $\varphi_{res} = 20^\circ$ )

Der durch die Schlingerkiele verursachte Anteil des quadratisch von der Rollgeschwindigkeit abhängenden Dämpfungsmomentes  $MS$  wird durch die Beziehung ( 126) wiedergegeben. Diese Beziehung gilt für zwei Schlingerkiele der Länge  $l_s$ , der Breite  $b_s$  und des Abstandes  $r$  vom Rollzentrum. Der Widerstandsbeiwert  $c_D$  stammt aus Messungen von Martin [31] und kann Abbildung 5, die der Arbeit von Blume entnommen wurde, auch für Wulstprofile entnommen werden. Die Größe  $x_0$  ist die Amplitude der Querbewegung der Schlingerkiele.

Der Faktor  $J$  für die Erhöhung der Umströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Verhältnis Kimmradius zu Schiffsbreite kann ebenfalls [20] entnommen werden. Dies ist in Abbildung 6 dargestellt.

$$MS = \rho b_s l_s J^2 r^3 c_D \dot{\varphi}^2 \quad (126)$$

Für den Abstand  $r$  der Schlingerkiele vom Rollzentrum wird die Beziehung ( 127) als Näherung angenommen.

$$r = \sqrt{T^2 + (0.5B)^2} \quad (127)$$

Aus dem in Gleichung ( 126) errechneten Dämpfungsmoment  $MS$  kann die aus den Schlingerkielen resultierende quadratische Dämpfungskonstante durch ( 128) bestimmt werden.

$$d_{Q2} = \frac{MS}{(\omega_\varphi \varphi_{res})^2} \quad (128)$$

Die in der Bewegungsgleichung ( 120) anzusetzende quadratische Rolldämpfungskonstante ergibt sich nach ( 129) als Summe von ( 125) und ( 128)

$$d_Q = d_{Q1} + d_{Q2} \quad (129)$$

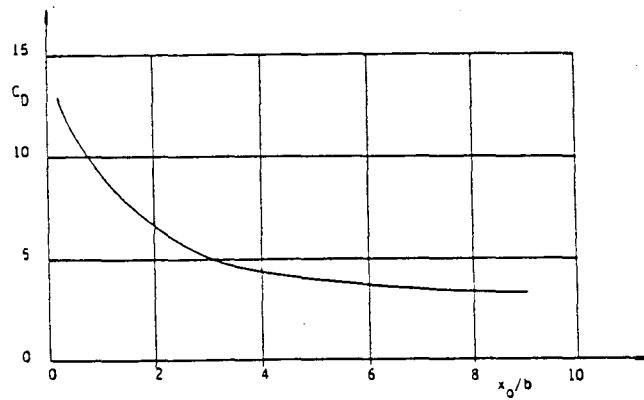


Abb. 5: Widerstandsbeiwert  $c_D$  nach [31]

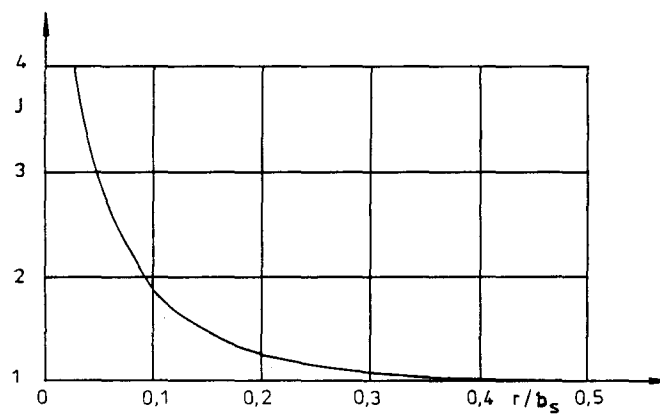


Abb. 6: Faktor für die Erhöhung der Umströmungsgeschwindigkeit

## 5.8 Äußeres Moment

Das in Gleichung ( 109) enthaltene auf den Schiffskörper wirkende äußere Moment  $M$  und die Übertragungsfunktionen für die Tauch-, Stampf-, Roll-, Quer- und Gierbewegung werden nach Programmen von Blume, die aus den Programmen von Kirsch [32] und Grim, Schenzle [33] entwickelt wurden, auf Grundlage der Streifenmethode berechnet. Das Programm zur Bestimmung der Übertragungsfunktionen der Quer-, Gier- und Rollbewegung wurde vom Verfasser so modifiziert, daß die erregenden Momente direkt ausgegeben werden.

Die linearisierten Bewegungsgleichungen für die Quer-, Gier- und Rollbewegung sind für symmetrische Schiffe nicht mit der Längs-, Tauch- und Stampfbewegung gekoppelt. Sie sind in regelmäßigen Wellen ( 130) bis ( 132).

$$(A_{yy} + m)\ddot{y} + D_{yy}\dot{y} + (A_{y\psi} + m x_G)\ddot{\psi} + D_{y\psi}\dot{\psi} + (A_{y\varphi} - z_G m)\ddot{\varphi} + D_{y\varphi}\dot{\varphi} = F_y \quad (130)$$

$$(A_{\psi y} + m x_G)\ddot{y} + D_{\psi y}\dot{y} + (A_{\psi\psi} + \Theta_z)\ddot{\psi} + D_{\psi\psi}\dot{\psi} + (A_{\psi\varphi} - \Theta_{xz})\ddot{\varphi} + D_{\psi\varphi}\dot{\varphi} = M_\psi \quad (131)$$

$$(A_{\varphi y} + m z_G)\ddot{y} + D_{\varphi y}\dot{y} + (A_{\varphi\psi} + \Theta_{zx})\ddot{\psi} + D_{\varphi\psi}\dot{\psi} + (A_{\varphi\varphi} - \Theta_x)\ddot{\varphi} + D_{\varphi\varphi}\dot{\varphi} + C_{\varphi\varphi}\varphi = M_\varphi \quad (132)$$

Hierin sind:

- $F_y$  horizontale Querkraft durch die Welle
- $M_\psi$  Giermoment (Moment um die Hochachse) durch die Welle
- $M_\varphi$  Rollmoment (Moment um die Längsachse) durch die Welle
- $A_{ij}$  hydrodynamische Massenträgheitskoeffizienten
- $D_{ij}$  hydrodynamische Dämpfungskoeffizienten
- $C_{\varphi\varphi}$  Rückstellkoeffizient des aufrichtenden Momentes
- $x_G$  x-Koordinate des Gewichtsschwerpunktes
- $z_G$  z-Koordinate des Gewichtsschwerpunktes

Die Trägheitsmomente  $\Theta_x$  und  $\Theta_z$  um die x-Achse bzw. um die z-Achse und das Zentrifugalmoment  $\Theta_{zx}$  errechnen sich nach den Beziehungen ( 133) bis ( 135)

$$\Theta_x = \int (z^2 + y^2) dm \quad (133)$$

$$\Theta_z = \int (x^2 + y^2) dm \quad (134)$$

$$\Theta_{zx} = \Theta_{xz} = \int x z dm \quad (135)$$

Die Lösung der gekoppelten linearen Differentialgleichungen ( 130) bis ( 132) erfolgt mit dem Ansatz ( 136).

$$\begin{pmatrix} y \\ \psi \\ \varphi \end{pmatrix} = Re \begin{pmatrix} Y_y \\ Y_\psi \\ Y_\varphi \end{pmatrix} \hat{\zeta} \cdot e^{i\omega_e t} \quad (136)$$

In ( 136) bezeichnen  $Y_y$ ,  $Y_\psi$  und  $Y_\varphi$  die nach der Streifenmethode bestimmten Übertragungsfunktionen. Dieser Ansatz führt zu dem in Matrizenform dargestellten Gleichungssystem ( 137).

$$\begin{bmatrix}
-\omega_e^2(A_{yy} + m) + i\omega_e D_{yy} & -\omega_e^2(A_{y\psi} + mx_G) + i\omega_e D_{y\psi} & -\omega_e^2(A_{y\varphi} + mz_G) + i\omega_e D_{y\varphi} \\
-\omega_e^2(A_{\psi y} + mx_G) + i\omega_e D_{\psi y} & -\omega_e^2(A_{\varphi\varphi} + \Theta_z) + i\omega_e D_{\psi\psi} & -\omega_e^2(A_{\varphi\varphi} + \Theta_{zx}) + i\omega_e D_{\psi\varphi} \\
-\omega_e^2(A_{\varphi y} - mz_G) + i\omega_e D_{\varphi y} & -\omega_e^2(A_{\varphi\psi} - \Theta_{zx}) + i\omega_e D_{\varphi\psi} & -\omega_e^2(A_{\varphi\varphi} + \Theta_x) + i\omega_e D_{\varphi\varphi} + C'
\end{bmatrix}
\cdot \begin{bmatrix} Y_y \\ Y_\psi \\ Y_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_y}{\zeta} \\ \frac{\hat{M}_\psi}{\zeta} \\ \frac{\hat{M}_\varphi}{\zeta} \end{bmatrix} \quad (137)$$

Aus der dritten Zeile der Matrixgleichung wird das hydrodynamische Moment dividiert durch die Wellenamplitude, hervorgerufen durch die Welle und die Kopplung mit der Quer- und Gierbewegung bestimmt.  $C$  ist das Produkt  $mgGM$ .

Das gesamte erregende Moment durch den Seegang wird durch die Überlagerung der Momente der regelmäßigen Seegangskomponenten berechnet ( 138).

$$M(t) = \sum_{n=1}^{NOM} \text{Re}\{[\hat{M}_\varphi - Y_y(-\omega_{en}^2(A_{\varphi y} - mz_G) + i\omega_{en}D_{\varphi y}) - Y_\psi(-\omega_{en}^2(A_{\varphi\psi} - \Theta_{zx}) + i\omega_{en}D_{\varphi\psi})] \cdot \hat{\zeta}_n \cdot e^{i\omega_{en}t}\} \quad (138)$$

## 5.9 Bestimmung der Hebelarme

Die Hebelarme werden mit dem Programm Archimedes [34] bestimmt. Das Programm ermöglicht die Berechnung der hydrostatischen Kennwerte der Unterwasserform eines Schiffes auch unter einer wellenförmigen Wasserlinie. Alle hydrodynamischen Einflüsse einschließlich des Smith-Effektes bleiben dabei unberücksichtigt. Als Wellenform in denen die den Simulationsrechnung zugrunde liegenden Hebelarme für die Wellenberglage und die Wellentallage berechnet werden (zur Wahl stehen eine Trochoiden- und eine Sinuswelle) wird eine Sinuswelle gewählt.

Die Hebelarme der aufrichtenden Momente werden vor der eigentlichen Simulation für die Wellenberg-, die Glattwasser- und die Wellentallage für verschiedenen Tiefgänge, Trimmwerte und Krängungswinkel für eine Wellenlänge, die gleich der Schiffslänge ist, berechnet. Während der Simulation werden die aktuellen Werte für den Tiefgang und den Trimm nach den Beziehungen ( 139) und ( 140) ermittelt.

$$T_{\text{aktuell}} = T_{\text{Glattwasser}} + z - a \quad (139)$$

$$tr_{\text{aktuell}} = tr_{\text{Glattwasser}} + Lpp(\vartheta + b) \quad (140)$$

Hierin bedeuten  $T_{\text{Glattwasser}}$  den Ausgangstiefgang des Schiffes (für den zugrunde gelegten Beladungsfall) im glatten Wasser,  $tr_{\text{Glattwasser}}$  den Ausgangstrimm,  $z$  die momentane Tauchung des Schiffes am Hauptspant,  $\vartheta$  den momentanen Stampfwinkel. Die Größe  $a$  bezeichnet die Amplitude der mittleren Senkung des Wasserspiegels,  $b$  die Amplitude der

mittleren Wasserspiegelneigung um die Querachse (Vgl. Abschnitt über die *äquivalente Welle*). Der aktuelle Krängungswinkel wird durch die Simulation bestimmt.

Zwischen den als Stützwerten eingelesenen aufrichtenden Hebeln  $h(T, tr, \varphi)$  werden die aktuellen Hebelarme für die Wellenberg-, die Wellental- und die Glattwasserlage des Schiffes während der Simulation interpoliert. Die dazu benutzte Interpolationsroutine legt in jeder Interpolationsrichtung durch die zwei Nachbarstützpunkte zu beiden Seiten des zu interpolierenden Punktes ein Polynom dritten Grades. Die Steigung des Polynoms in jedem dieser Nachbarpunkte wird gleich dem Differenzenquotienten von dessen Nachbarpunkten angesetzt.

Die Abhängigkeit des aufrichtenden Hebels von der Amplitude  $c$  der äquivalenten Welle wird quadratisch zwischen den Werten für Wellenberg, Glattwasser und Wellental interpoliert. Nachdem die Hebelarme für die aktuellen Werte  $T$ ,  $tr$  und  $\varphi$  für glattes Wasser, sowie für eine ausgewählte Höhe der *äquivalenten* Welle in Wellenberg- und Wellental-lage interpoliert worden sind, wird der Hebelarm für die tatsächlich vorhandene Höhe der *äquivalenten* Welle quadratisch zwischen diesen drei Werten interpoliert ( 141).

Der Wert für  $c$  wird durch die entsprechende Übertragungsfunktion bestimmt,  $\zeta_z$  ist eine Größe, mit der die Höhe des Schiffswellensystems stark vereinfacht berücksichtigt werden kann. (Das Fahrtwellensystem könnte man etwas genauer berücksichtigen, indem man mit einer angenommenen Fahrtwelle die Hebelarmberechnungen durchführt.)

$$h(\varphi, T, tr, t) = h_{GW}(\varphi, T, tr) + \frac{c + \zeta_z}{2\zeta_R} (h_{WB}(\varphi, T, tr) - h_{WT}(\varphi, T, tr)) + \frac{(c + \zeta_z)^2}{2\zeta_R^2} (h_{WB}(\varphi, T, tr) - 2h_{GW}(\varphi, T, tr) + h_{WT}(\varphi, T, tr)) \quad (141)$$

Hierin sind  $h_{GW}(\varphi, T, tr)$ ,  $h_{WB}(\varphi, T, tr)$  und  $h_{WT}(\varphi, T, tr)$  die Glattwasser-, Wellenberg- und Wellentalhebelarme für die aktuellen Werte von Tiefgang, Trimm und Krängungswinkel. Die Größe  $c$  ist die Amplitude der äquivalenten Welle mit der Länge des Schiffes und Wellenberg bzw. Wellental am Hauptspant. (Vgl. Abschnitt über die äquivalente Welle). Die Größe  $\zeta_R$  ist die Amplitude (halbe Wellenhöhe), mit der die tabellierten Hebelarme in Wellen berechnet wurden.

Beispielrechnungen mit dem erstellten Simulationsprogramm zeigten eine geringe Empfindlichkeit der Ergebnisse gegenüber Änderungen von Wellenlänge und Wellenhöhe, die den Hebelarmberechnungen zugrunde lagen.

In Tabelle I sind die Ergebnisse von Simulationsrechnungen aufgetragen. Für diese Berechnungen wurde von einem Hauptbegegnungswinkel von  $60^\circ$ , einer Geschwindigkeit von  $16 \text{ kn}$  und einer metazentrische Höhe von  $0.59 \text{ m}$  ausgegangen. Der Hauptomegawert war  $\omega_H = 0.38$ , der Omegabereich  $0.5\omega_H \leq \omega_H \leq 1.5\omega_H$ . Es wurden 25 Seegangskomponenten berücksichtigt (5 Winkel und 5 Frequenzen), die Simulationszeit betrug  $6000 \text{ s}$ ; die im Simulationsprogramm angegebene Wellenhöhe betrug  $8.5 \text{ m}$ , die Wellenlänge  $127.5 \text{ m}$ .

Wellenlänge	Wellenhöhe	$\varphi_{min}$	$\varphi_{max}$
127.5	8.50	-23.08	20.93
102.0	8.50	-22.46	20.70
153.0	8.50	-23.37	21.00
127.5	12.75	-24.59	21.58
127.5	6.38	-22.33	20.71

Tabelle I

Der negative Wert des Rollwinkels  $\varphi$  ist aufgrund des Anstoßes von  $+28.6^\circ$  größer als der positive Wert, da eine Dämpfung berücksichtigt wird.

Die Ergebnisse zeigen, daß die der Berechnung der Hebelarme mit dem Programm Archimedes zugrunde liegende Wellenlänge bzw. -höhe nur einen geringen Einfluß auf die Ergebnisse der Simulationsberechnung hat.

Damit ist die Vorgehensweise des Einführens einer äquivalenten Welle, deren Länge gleich der Schiffslänge ist, als zulässig bestätigt worden.

## 5.10 Längsbewegung

Die Berücksichtigung der Längsbewegung erfolgt aufgrund der Gefahr des *Mitgenommen-Werdens* des Schiffes von den Wellen bei größeren Froudezahlen. Ferner ist die Zeitdauer, die das Schiff auf einem Wellenberg oder in einem Wellental verharret, für die Gefahr des Kenterns von großer Bedeutung. Diese Zeitdauer wird durch die seegangsbedingte, der mittleren Bewegung überlagerte Längsbewegung beeinflusst. Dies wird von Grim [35] gezeigt.

Die Gleichgewichtsbedingung für ein Schiff, das oszillierende Längsbewegungen ausführt, lautet ( 142):

$$R - T_S + \Delta R + m^* \ddot{\xi} = 0 \quad (142)$$

Hierin sind:

- $R$  Widerstand des Schiffes als Funktion der Schiffsgeschwindigkeit, die sich aus der mittleren Schiffsgeschwindigkeit im glatten Wasser und der durch den Seegang bedingten Zusatzgeschwindigkeit ergibt.
- $T_S$  Propellerschub ohne Soganteil
- $\Delta R$  Widerstand durch die Wellen in Abhängigkeit von der Lage des Schiffes relativ zu den Wellen
- $m^*$  Masse des Schiffes einschließlich der hydrodynamischen Masse für Längsbeschleunigung. Diese Größe wird nach einem Vorschlag von Söding [36] zu ( 143) bestimmt.
- $\ddot{\xi}$  Beschleunigung des Schiffes in Fahrtrichtung

$$m^* = m + 2.7 m \frac{\nabla^{2/3}}{L^2} \quad (143)$$

Hierin sind

- $m$  Masse des Schiffes (ohne hydrodynamische Anteile)
- $\nabla$  Verdrängung des Schiffes
- $L$  Länge des Schiffes

Mit ( 144), der Annahme konstanten Schubes ( $T_S = T_S(v)$ ) und der Beziehung  $T_S(v_0) = R(v_0)$  wird ( 142) zu ( 145)

$$R = R(v_0) \left( \frac{v_0 + \dot{\xi}}{v_0} \right)^2 \quad (144)$$

$$\frac{R(v_0)2\dot{\xi}}{v_0 m^*} + \frac{R(v_0)\dot{\xi}^2}{v_0^2 m^*} + \frac{\Delta R}{m^*} + \ddot{\xi} = 0 \quad (145)$$

Mit den Kürzeln ( 146) und ( 147) folgt aus ( 145) die Beziehung ( 148)

$$AA = \frac{2R(v_0)}{v_0 m^*} \quad (146)$$

$$BB = \frac{R(v_0)}{v_0^2 m^*} \quad (147)$$

$$\ddot{\xi} = - \left( AA \dot{\xi} + BB \dot{\xi}^2 + \frac{\Delta R}{m^*} \right) \quad (148)$$

Der Glattwasserwiderstand  $R$  wird nach einem im Vorentwurf üblichen Verfahren abgeschätzt. Bei den im Anhang A gezeigten Ergebnissen wurde das Verfahren von Holtrop und Mennen [37] angewandt. Es beruht auf statistischen Auswertungen von Modellversuchen gebauter Schiffe.

Blume [22] hat die Widerstandsänderung für ein Schiff, das sich stationär durch regelmäßige Wellen bewegt, in Abhängigkeit von der Lage relativ zur Welle mit Mitteln der Wellenwiderstandstheorie berechnet. Die Störungen um das Schiff wurden einmal durch eine stetige Quellen-Senken-Verteilung auf der Mittellängsebene des Schiffes und einmal durch eine Belegung auf Oberflächenelementen nach dem Verfahren von Hess und Smith dargestellt. Blume verglich die so erhaltenen Längskräfte miteinander und mit den Kräften, die sich unter der Annahme ungestörter Druckverteilung in der Welle ergeben. Dabei zeigte sich fast gleiches Verhalten für alle drei Rechnungen. Die quantitativen Differenzen der nach den verschiedenen Methoden berechneten Längskräfte  $R$  waren bei kleinen Wellenlängen, relativ zur Kraft selbst, groß. Die Übereinstimmung nahm aber mit wachsenden Wellenlängen zu. Im praktisch interessierenden Bereich (Wellenlänge/Schiffslänge  $> 0.8$ ), waren die Unterschiede so klein, daß durch Modellversuche nicht nachgewiesen werden konnte, welches Verfahren die richtigeren Ergebnisse liefert. Blume hat dazu Modellversuche von Du Cane und Goodrich nachgerechnet und die Größenordnung der tatsächlich gemessenen erregenden Längskraft bestätigt. Er hält es in Anbetracht der kleinen Ergebnisdifferenzen für eine zulässige Näherung, von der Druckverteilung in der ungestörten Welle ausgehend, die erregende Längskraft zu ermitteln.

Da für die Längsbewegung nur Wellenlängen, die größer als 0.8-Schiffslänge sind, Bedeutung haben, wird hier die Lösung über die Kraft in horizontaler Richtung erzielt. Der örtliche Auftrieb wird normal zu Flächen gleichen Druckes angesetzt. Die Integration der Horizontalkomponenten des Auftriebes über die Schiffslänge ergibt eine Näherung für die erregende Kraft  $\Delta R$ . Im Folgenden wird die Widerstandsänderung, die eine regelmäßige Seegangskomponente bewirkt, nach ( 149) bestimmt.

$$\Delta R_n = - \left( g - \ddot{z} + x_s \ddot{\vartheta} \right) \rho \int_L A(x) \zeta'_n(x, t) e^{-\frac{2\pi}{\lambda_n} \frac{T}{2}} dx \quad (149)$$

Hier bedeuten:

$\Delta R_n$  Widerstandserhöhung aus einer Seegangskomponente  $n$

$A(x)$  Getauchte Spantfläche des Schiffes an der Stelle  $x$

$t$  Zeit

- $T$  aktueller Tiefgang des Schiffes  
 $\lambda_n$  Wellenlänge der Seegangskomponente  $n$   
 $\ddot{\vartheta}$  Stampfbeschleunigung

Der Höhenkoordinatenanteil einer Seegangskomponente an der Höhenkoordinate des Wasserspiegels unter der  $x$ -Achse folgt aus Gleichung ( 150)

$$\zeta'_n(x, t) = Re \left[ \hat{\zeta}_n e^{i(\omega_{en}t - k_n(x+\xi)) \cos \mu_n} \right] \quad (150)$$

In dieser Beziehung sind:

- $k_n$  Wellenzahl der Seegangskomponente  $n$  ( $k_n = 2 \frac{\pi}{\lambda_n}$ )  
 $\omega_{en}$  Begegnungsfrequenz der Seegangskomponente  $n$  ( $\omega_{en} = \omega_{0n} - k_n v \cos \mu_n$ )  
 $\omega_{0n}$  Kreisfrequenz der Seegangskomponente  $n$  im  $x_0, -y_0$ -Koordinatensystem  
 $\mu_n$  Begegnungswinkel der Seegangskomponente  $n$   
 $\hat{\zeta}_n$  Komplexe Anplitude der Seegangskomponente  $n$

Aus ( 150) folgt durch Bildung der Ableitung nach  $x$  die Beziehung ( 151)

$$\frac{d\zeta_n}{dx} = \zeta'_n(x, t) = Re \left[ -\hat{\zeta}_n i k_n \cos \mu_n e^{i(\omega_{en}t - k_n(x+\xi)) \cos \mu_n} \right] \quad (151)$$

Dies in ( 149) eingesetzt ergibt ( 152).

$$\Delta R_n = -\rho \left( g - \ddot{z} + x_s \ddot{\vartheta} \right) \int_{-\frac{L}{2} + \xi}^{\frac{L}{2} + \xi} A(x) Re \left[ -\hat{\zeta}_n i k_n \cos \mu_n e^{i(\omega_{en}t - k_n(x+\xi)) \cos \mu_n} \right] e^{-\frac{2\pi}{\lambda_n} \frac{T}{2}} dx \quad (152)$$

Unter der Berücksichtigung der Definition für die Wellenzahl und der Zusammenfassung von Vorzeichen folgt aus ( 152) nach Umordnen der einzelnen Faktoren und Operatoren ( 153)

$$\Delta R_n = +\rho \left( g - \ddot{z} + x_s \ddot{\vartheta} \right) e^{-k_n \frac{T}{2}} Re \left[ \hat{\zeta}_n i k_n \cos \mu_n e^{i\omega_{en}t} \int_{-\frac{L}{2} + \xi}^{\frac{L}{2} + \xi} A(x) e^{-ik_n(x+\xi) \cos \mu_n} dx \right] \quad (153)$$

Die Gleichung ( 154) folgt aus ( 153) durch Ausmultiplikation und Beschränkung der Integration auf die von  $x$  abhängigen Terme.

$$\Delta R_n = +\rho \left( g - \ddot{z} + x_s \ddot{\vartheta} \right) e^{-k_n \frac{T}{2}} Re \left[ \hat{\zeta}_n i k_n \cos \mu_n e^{i\omega_{en}t} \cdot e^{-ik_n x \cos \mu_n} \int_{-\frac{L}{2} + \xi}^{\frac{L}{2} + \xi} A(x) e^{-ik_n \xi \cos \mu_n} dx \right] \quad (154)$$

Im natürlichen Seegang wird der Zusatzwiderstand nach der Beziehung ( 155) als Summe der aus den Einzelwellen resultierenden Zusatzwiderstände  $\Delta R_n$  bestimmt.

$$\Delta R = \sum_{n=1}^{NOM} \Delta R_n \quad (155)$$

### 5.11 Bestimmung der Beschleunigung parallel zu den Decks

Zur Beurteilung der Gefahr des Verrutschens von Ladung wird die aus den Schiffsbewegungen und der Erdbeschleunigung resultierende Beschleunigungskomponente  $b_e$  querschiffs, parallel zu den Schiffsdecks in der Spantebene  $x = x_b$  nach der Beziehung (156) bestimmt.

$$b_e = (-g + \ddot{z} - x_b \ddot{\vartheta}) \sin \varphi + (\ddot{y} - z_b \ddot{\varphi} + x_b \ddot{\psi}) \cos \varphi \quad (156)$$

Hierin sind:

- $\ddot{z}$  Vertikalbeschleunigung des Schiffes am Hauptspant berechnet nach der Streifenmethode
- $\ddot{\vartheta}$  Stampfbeschleunigung berechnet nach der Streifenmethode
- $\ddot{y}$  Querschiffsbeschleunigung, berechnet nach der Streifenmethode
- $z_b$  z-Koordinate, an der die Beschleunigung parallel Deck berechnet wird
- $x_b$  x-Koordinate, an der die Beschleunigung parallel Deck berechnet wird
- $\ddot{\psi}$  Gierbeschleunigung, berechnet nach der Streifenmethode

## 6 Rechenergebnisse

Mit dem Programmsystem (ein Vorprogramm zur Datenaufbereitung, ein Hauptprogramm zur Durchführung der Simulation und ein Programm zur Erzeugung der Ergebnisplots) wurden mit systematisch variierten Eingabewerten Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Anhängen A und B zahlenmäßig und im Anhang C in Form von Plots dargestellt. Die Bilder zeigen Ergebnisse für einzelne Prozesse in Abhängigkeit von der Zeit und Histogramme für den Rollwinkel.

Um die Auswirkungen eventueller Anfangsstörungen auf die Ergebnisse auszuschließen, wurde die relativ große Simulationszeit von 6000 s allen Berechnungen zugrunde gelegt.

Allen Simulationsläufen gemeinsam ist eine Winkelverteilung für die Wellenaufrichtung in einem Bereich von  $60^\circ$  um die mittlere Laufrichtung.

Der unregelmäßige Seegang wird in allen Simulationsfällen aus 25 regelmäßigen Wellenkomponenten superponiert. In einem ebenfalls eingegebenen Bereich für die Wellenkreisfrequenzen  $\omega$  werden fünf Frequenzen bis auf einen Zufallszahleneinfluß, der auf die Nachkommastellen zur Vermeidung von Periodizitäten wirkt, gleichmäßig verteilt. Um jeden dieser  $\omega$ -Werte schwanken die Begegnungswinkel  $\mu$  so, daß die ebenfalls zu fünf angenommene Anzahl der Begegnungswinkel bis auf einen Zufallsfaktor gleichmäßig in dem zulässigen Bereich verteilt werden. Die so erzeugte Zufälligkeit ist so beschaffen, daß zu allen  $\omega$ -Werten immer verschiedene  $\mu$ -Werte zugeordnet werden, d.h. es entstehen fünfundzwanzig regelmäßige Wellenkomponenten mit jeweils verschiedenen Kreisfrequenzen und Begegnungswinkeln.

Eine Erhöhung der Anzahl der regelmäßigen Seegangskomponenten, aus denen der unregelmäßige Seegang superponiert wird, hatte auf die Simulationsergebnisse keinen wesentlichen Einfluß, eine Reduzierung auf weniger als zehn Seegangskomponenten ließ keine eindeutigen Schlußfolgerungen auf die Genauigkeit zu.

Zur Bestimmung der Amplituden der Wellenkomponenten wird das JONSWAP-Spektrum benutzt.

Alle Berechnungen erfolgen für die E.L.M.A. Tres. Dieses Schiff besitzt eine Länge von 127.5 m, eine Breite von 21.0 m und bei einem Tiefgang von 7.59 m eine Verdrängung von ca. 14160 m<sup>3</sup>. Abbildung 7, die [38] entnommen wurde, zeigt dieses Schiff.

Der Schiffskörper wird im Simulationsprogramm durch 21 äquidistant angeordnete Spanten angenähert.

Beispielrechnungen haben gezeigt, daß für den Zeitschritt, der den Simulationsrechnungen zugrunde gelegt wird, eine Sekunde ein sinnvoller Wert ist. Eine Verkleinerung des Zeitschrittes führte zu keiner wesentlichen Auswirkung auf die Ergebnisse. (Die Ergebnisse unterschieden sich bei dem Übergang auf 0.25 Sekunden um weniger als 0.1 Prozent.) Eine Vergrößerung des Zeitschrittes auf Werte von mehr als zwei Sekunden hatte eine starke Ergebnisveränderung zur Folge, sodaß diese Erhöhung nicht mehr als zulässig erachtet wird.

Es werden Simulationsrechnungen für die Hauptbegegnungswinkel von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  und  $180^\circ$  durchgeführt. Diese Berechnungen erfolgen für den Fall der Berücksichtigung und der Vernachlässigung der Kopplung der Rollbewegung mit der Längsbewegung.

Die kennzeichnende Periode des Seeganges wird zu 7.592 s, 9.040 s und 12.642 s an-

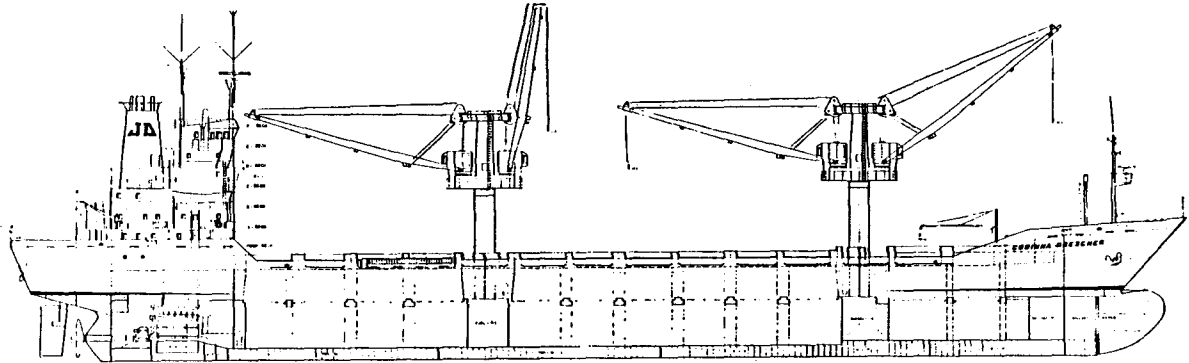


Abb. 7: E.L.M.A. Tres

genommen. Die bei diesen Perioden berücksichtigte kennzeichnende Wellenhöhe ist 8.5m. Für den Fall, daß die kennzeichnende Periode 9.040 s beträgt, werden die Rechnungen auch für eine kennzeichnende Wellenhöhe von 6.0 m durchgeführt.

Für diese vier Parameterkombinationen wurden die metazentrische Höhe bzw. die Höhe des Gewichtsschwerpunktes und die Glattwasserschiffsgeschwindigkeit variiert.

Es werden  $\overline{GM}$ -Werte von 0.78 m, 0.58 m, 0.38 m und 0.18 m berücksichtigt. Die diesen metazentrischen Höhen entsprechenden  $\overline{KG}$ -Werte sind 7.9 m, 8.1 m, 8.3 m und 8.5 m. Die Glattwassergeschwindigkeit wird zu 0.0 m/s, 5.14 m/s, 7.72 m/s und 10.26 m/s angenommen; diesen Geschwindigkeiten entsprechen Froude-Zahlen von 0.0, 0.145, 0.218 und 0.290.

In Anhang A sind in Abhängigkeit der variierten Parameter die Ergebnisse der Simulationen aufgetragen. Es werden jeweils der maximale und der minimale Rollwinkel bzw. die Anzahl der Kenterungen, die während der Simulation auftraten und die Streuung des Rollwinkels aufgetragen. In der Spalte für  $\omega_\varphi$  ist die Rolleigenfrequenz des Schiffes in glattem Wasser. In den daneben stehenden drei Spalten sind jeweils Verhältnisse dieser Frequenz zu Begegnungsfrequenzen aufgelistet.

Das Verhältnis  $\omega_\varphi/\omega_{e1}$  wurde mit einer Begegnungsfrequenz berechnet, der eine Wellenlänge von der Schiffslänge multipliziert mit dem Cosinus des Begegnungswinkels zugrunde lag. Das Verhältnis  $\omega_\varphi/\omega_{e2}$  wurde mit einer Begegnungsfrequenz gebildet, der die Kreisfrequenz des Maximums des Seegangsspektrums zugrunde lag. Im Verhältnis  $\omega_\varphi/\omega_{e3}$  ist  $\omega_{e3}$  die Begegnungsfrequenz, die mit dem Maximum des Begegnungsspektrums ermittelt wurde.

In Anhang A und B sind in Abhängigkeit der variierten Parameter die Anzahl der Kenterungen während der Simulationszeit aufgetragen.

Als Kenterursache im Seegang kommen drei Hauptursachen in Frage. Die parametrische Erregung, ein reiner Stabilitätsverlust (das Schiff bleibt so lange in der Wellenbergsituation liegen, daß es durch negative Hebelarme in einer Periode kentert) und das Querschlagen des Schiffes. Da im vorliegenden Simulationsmodell nur eine lineare Kopplung mit der Gierbewegung berücksichtigt wird, scheidet das Querschlagen des Schiffes hier als Kenterursache aus.

Es wird erwartet, daß Kentern hauptsächlich als Folge einer parametrischen Erregung auftritt. In diesen Fällen bestehen verschiedene Möglichkeiten für die Erregung. Die Begegnungsfrequenz hat einen wesentlichen Einfluß auf die parametrische Erregung. Sowohl eine sehr kleine Begegnungsfrequenz als auch eine Begegnungsfrequenz, die größenordnungsmäßig im Bereich des Maximums des Spektrums liegt, können hohe Kenterhäufigkeiten implizieren. Desweiteren ist es von Bedeutung, wieviele dieser als gefährlich betrachteten Frequenzen der Einzelwellen, aus denen der unregelmäßige Seegang superponiert wird, in dem Bereich dieser Größen liegen.

Aus Anhang B ist ersichtlich, daß die stärkste Gefährdung bei schrägachterlicher See ( $\mu = 45^\circ$ ) gegeben ist, während der Fall von quereinkommender See ( $\mu = 90^\circ$ ) der sicherste ist. Keine Parameterkombination führte bei quereinkommender See zu einem Kenterfall. Es ist jedoch zu beachten, daß alle Wellenlängen der Seegangskomponenten so klein sind, daß ihre Kreisfrequenzen nicht mit den möglichen Rolleigenfrequenzen des Schiffes in einem Verhältnis stehen, die eine Resonanz erwarten lassen.

Der kennzeichnenden Periode des Seeganges von 9.040 s entspricht eine Wellenlänge von 127.5 m (Beispielschiffslänge). In der Literatur werden Fälle, für die die Wellenlänge gleich der Schiffslänge ist, für besonders gefährdet erachtet. Die Auswertung der gerechneten Fälle bestätigte dies nicht für alle in Frage kommenden Parameterkombinationen. Für geringere Geschwindigkeiten ( $v = 0$  m/s und  $v = 5.14$  m/s) traf diese Theorie eher zu als für die höheren Geschwindigkeiten. Bei den höheren Geschwindigkeiten waren die Kenterhäufigkeiten bei kürzeren Wellen ( $\lambda = 0.7 \bullet$  Schiffslänge) für achterlich und schrägachterlich auf das Schiff einwirkende Seegänge am größten. Bei seitlich und vorlich einkommenden Seegängen führten diese Wellenlängen bei keiner Parameterkombination zum Kentern des Schiffes.

Bei langen Wellen (Wellenlänge =  $2 \bullet$  Schiffslänge) nimmt die Gefährdung des Schiffes bei achterlich einkommender See mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Bei von vorn einkommender See ist in langen Wellen keine eindeutige Aussage über die Abhängigkeit der Kenterhäufigkeit von einzelnen Parametern treffbar.

Die Berücksichtigung der Längsbewegung führte in den Fällen, bei denen das Schiff ohne Fahrtgeschwindigkeit dem Seegang ausgesetzt war, bei achterlicher See in fast allen Fällen (Ausnahme  $\lambda = 250$  m,  $\mu = 0^\circ$ ) zu einer Erhöhung der Kenterhäufigkeit.

Bei einer endlichen Fahrgeschwindigkeit des Schiffes war eine eindeutige Tendenz, die den Einfluß der Kopplung der Längsbewegung mit der Rollbewegung des Schiffes auf dessen Kenterhäufigkeit wiedergibt, nicht feststellbar. In den meisten Fällen wurde die Kenterhäufigkeit bei der Berücksichtigung der Kopplung mit der Längsbewegung in von vorn einkommendem Seegang reduziert.

Der Einfluß der  $\overline{GM}$ - bzw. der  $\overline{KG}$ -Werte auf die Kenterhäufigkeit ist nicht derart, daß eine größere Anfangsstabilität kleinere Kenterhäufigkeiten verursacht.

Für den Fall, daß Resonanz der Erregerfrequenzen (Begegnungsfrequenzen) mit der Rolleigenfrequenz des Schiffes (incl. der Ladung) als Kriterium für die Häufigkeit des Kenterns herangezogen wird, ist zu beachten, daß sich die Rolleigenfrequenz des Schiffes im Seegang von der Rolleigenfrequenz, die für glattes Wasser bestimmt wurde, erheblich unterscheiden kann.

## Literatur

- [1] Kastner, S.  
Kenterversuche mit einem Modell in natürlichem Seegang.  
Schiffstechnik, 1962, S.161/164
- [2] Kastner, S.  
Modellversuche im achterlichen Seegang mit dem Küstenmotorschiff *Lohengrin*.  
Hansa 1964, S.1212/1217
- [3] Kastner, S.  
Kenterversuche in der Eckernförder Bucht im Jahre 1968  
IfS-Bericht Nr.292, 1973
- [4] Roden, S.  
Welche Ergebnisse liefern Kenterversuche mit Modellen?  
Schiffstechnik, 1962, S.165/172
- [5] Roden, S.  
Modellversuche in natürlichem Seegang.  
Jahrbuch der STG, Band 56, 1962, S.132/143
- [6] Vossers, G.; Swaan, W.A.; Rijken,H.  
Experiments with series 60 models in waves.  
International Shipbuilding Progress 1961 S.201/232
- [7] Chou, S.J.  
Capsizing experiments in San Franzisko Bay.  
Annual Report 1973 Dep. of Naval Architecture,  
University of California Berkeley 1973
- [8] Haddara, M.R; Kastner, S.; Magel,L.F.; Paulling, J.R.; Pérez y Pérez, L.;  
Wood, P. D.  
Capsizing experiments with the model of a fast cargo liner in San Francisco Bay.  
Bericht an die U.S. Coast Guard, Berkeley 1972
- [9] Blume, P. und Hattendorf, H.G.  
Conclusions from the results of tank tests regarding the stability of modern ship  
designs.  
Workshop on ship stability, Hamburg 1984  
Veröffentlichung der HSVA ohne spezielle Nummerierung.
- [10] Proceedings of the International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles.  
Glasgow, March 1975
- [11] Proceedings of the second International Conference on Stability of Ships and Ocean  
Vehicles.  
Tokyo, October 1982
- [12] Grim, O.  
Rollschwingungen, Stabilität und Sicherheit im Seegang.  
Schiffstechnik 1951, S.10/21

- [13] Krappinger, O.  
Über Kenterkriterien.  
Schiffstechnik 1962, S.145/154
- [14] Abicht, W.  
Die Sicherheit der Schiffe im nachlaufenden unregelmäßigen Seegang.  
IFS-Bericht Nr.274, 1971
- [15] Paulling, J. R.; Oakley, O. H.; Wood, P. D.  
Ship motions and capsizing in astern seas.  
Proceedings Tenth Symposium on Naval Hydrodynamics ACR-204, Office of Naval Research, 1974, S.297-350
- [16] Söding, H.  
Gutachten über Belastungen des Schiffes E.L.M.A. Tres durch Seegang am Vormittag des 26.11.1981.  
IFS-Schrift Nr.2327, 1982
- [17] Söding, H.  
Leckstabilität im Seegang.  
IFS-Bericht Nr.429, 1982
- [18] Söding, H.; Böttcher, H.; Petey, F.  
Abschlußbericht zum Vorhaben SG II 1 - E/S21B/D0078/B5201 Leckstabilität im Seegang 1.Band  
Hamburg, Februar 1986
- [19] Grim, O.  
Beitrag zu dem Problem der Sicherheit des Schiffes im Seegang.  
Schiff und Hafen 1961, S490/497
- [20] Blume, P.  
Experimentelle Bestimmung von Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung und ihre Anwendung zur Abschätzung extremer Rollwinkel.  
Schiffstechnik, 1979, S.3/29
- [21] Blume, P.; Hattendorf, H.G.  
Stabilität und Ketersicherheit moderner Handelsschiffe.  
Bericht Nr. S165/83 Hamburgische Schiffbau- Versuchsanstalt GmbH 1983
- [22] Blume, P.  
Zur Frage der erregenden Längskraft in von achtern kommenden regelmäßigen Wellen.  
IFS-Bericht 334, 1976
- [23] Yasuaki, D.  
Observation of stern wave generation proceedings of the continued workshop on ship wave, resistance computations.  
Izu Shuzenji, Japan, Oct. 1980
- [24] Söding, H.  
Lastannahmen bei der direkten Dimensionierung.  
22. IFS-Fortbildungskurs Bemessung schiffbaulicher und meerestechnischer Konstruktionen.; 1986

- [25] Richter, K.  
Seegang als Grundlage für die Ermittlung von hydrodynamischen Lasten.  
Jahrbuch der STG 1981
- [26] Hasselmann, K.  
Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP).  
Dt. Hydrogr. Z. Reihe A (8 ) 12 (1973)
- [27] Hasselmann, K.  
A Parametric Wave Prediction Model.  
J. Phys. Oceanogr.6 (1976)
- [28] Huang, N.E.; Long, S.E.; Tung, C.C; Yuen, Y.; Bliven, L.F.  
A unified two-parameter wave spectral model for a general sea state.  
Journal Fluid Mechanics 1981, S.203-224
- [29] Gadd, G. E.  
Bilge keels and bilge vanes.  
National Physical Laboratory -Ship division- Ship report 64, 1964
- [30] Baker, G. S.  
Rolling of ships underway. The decrement of roll due to hull and bilge keels.  
Transactions of the north east coast insitution of engineers and shipbuilders, Volume 56, 1939
- [31] Martin, M.  
Roll damping due to bilge keels.  
Iowa Institute of Hydraulic Research Report, Contract Nonr 1611(01), 1958
- [32] Kirsch, M.  
Die Berechnung der Bewegungsgrößen der gekoppelten Tauch- und Stampfbewegungen nach der erweiterten Streifentheorie von Grim und die Berechnung der Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten bestimmter Schranken durch diese Größen.  
IfS-Bericht Nr.241, 1969
- [33] Grim, O.; Schenzle, P.  
Der Einfluß der Fahrtgeschwindigkeit auf die Torsionsbelastung eines Schiffes im Seegang.  
FDS-Bericht Nr.7, 1969
- [34] Poulsen, I.  
Benutzerhandbuch für das Programm-System Archimedes 76.  
ESS-Bericht Nr.20, 1976
- [35] Grim, O.  
Das Schiff in von achtern kommenden Seegang.  
Schiffstechnik 1983, S.84/94
- [36] Söding, H.  
Manövrieren von Schiffen I.  
IfS-Vorlesung 1980/81

- [37] Holtrop, J.; Mennen, G.G.J.  
An approximate power prediction method.  
International Shipbuilding Process, 1981, S.166/70
- [38] New Ships, Volume 24, No. 3, 1979

## A Anhang A

Kennzeichnende Periode	$T_1$	=	7.592 s
Kennzeichnende Wellenhöhe	$WH_{1/3}$	=	8.5 m
Anzahl der Frequenzen	$NOM$	=	5
Anzahl der Begegnungswinkel	$NMUE$	=	5
Anzahl der Einzelwellen	$NWELLE$	=	25
Simulationszeit	$TMAX$	=	6000 s
Kopplung mit der Längsbewegung berücksichtigt			

Hauptbegegnungswinkel 0°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.469	0.470	0.	-0.571	0.665	-	0.001
0.58	0.284	0.408	0.405	0.405	0.	-0.383	0.378	-	0.001
0.38	0.230	0.331	0.328	0.328	0.	-0.284	0.338	-	0.001
0.18	0.158	0.227	0.225	0.225	0.	-0.536	0.593	-	0.002
0.78	0.329	0.744	0.742	0.736	5.14	-2.223	2.243	-	0.015
0.58	0.284	0.643	0.640	0.635	5.14	-8.046	8.670	-	0.021
0.38	0.230	0.520	0.519	0.514	5.14	-34.237	36.144	-	0.161
0.18	0.158	0.357	0.356	0.353	5.14	< -90	> 90	47	0.351
0.78	0.329	1.045	1.045	1.036	7.72	-9.990	9.254	-	0.063
0.58	0.284	0.902	0.902	0.894	7.72	-21.851	21.590	-	0.131
0.38	0.230	0.730	0.730	0.724	7.72	< -90	38.458	4	0.241
0.18	0.158	0.502	0.502	0.497	7.72	< -90	> 90	11	0.236
0.78	0.329	1.744	1.768	1.721	10.26	-18.162	18.829	-	0.094
0.58	0.284	1.505	1.526	1.486	10.26	-30.353	24.162	-	0.127
0.38	0.200	1.219	1.236	1.203	10.26	< -90	> 90	8	0.235
0.18	0.158	0.837	0.849	0.827	10.26	-15.813	12.697	-	0.067

Hauptbegegnungswinkel 45°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.469	0.470	0.	< -90	> 90	2	0.201
0.58	0.284	0.343	0.405	0.405	0.	< -90	> 90	8	0.355
0.38	0.230	0.278	0.328	0.328	0.	< -90	> 90	7	0.247
0.18	0.158	0.191	0.225	0.225	0.	< -90	> 90	4	0.149
0.78	0.329	0.574	0.634	0.631	5.14	-21.628	22.441	-	0.089
0.58	0.284	0.495	0.547	0.545	5.14	-66.097	> 90	13	0.290
0.38	0.230	0.401	0.443	0.441	5.14	< -90	> 90	55	0.382
0.18	0.158	0.275	0.304	0.303	5.14	< -90	> 90	67	0.357
0.78	0.329	0.737	0.769	0.762	7.72	< -90	> 90	2	0.235
0.58	0.284	0.636	0.664	0.658	7.72	< -90	> 90	5	0.269
0.38	0.230	0.515	0.538	0.533	7.72	< -90	> 90	23	0.315
0.18	0.158	0.354	0.370	0.366	7.72	< -90	> 90	69	0.378
0.78	0.329	1.027	0.977	0.973	10.26	-49.618	> 90	3	0.221
0.58	0.284	0.887	0.843	0.840	10.26	-52.802	> 90	18	0.298
0.38	0.200	0.718	0.683	0.680	10.26	< -90	> 90	50	0.347
0.18	0.158	0.493	0.469	0.467	10.26	-41.886	> 90	2	0.198

Hauptbegegnungswinkel 90°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	-	0.469	0.470	0.	-46.439	48.156	-	0.177
0.58	0.284	-	0.405	0.405	0.	-34.122	36.110	-	0.151
0.38	0.230	-	0.328	0.328	0.	-36.327	37.262	-	0.148
0.18	0.158	-	0.225	0.225	0.	-4.301	4.971	-	0.021
0.78	0.329	-	0.469	0.470	5.14	-44.833	41.767	-	0.195
0.58	0.284	-	0.405	0.405	5.14	-28.924	28.237	-	0.094
0.38	0.230	-	0.328	0.328	5.14	-4.075	4.098	-	0.016
0.18	0.158	-	0.225	0.225	5.14	-4.948	4.364	-	0.023
0.78	0.329	-	0.469	0.470	7.72	-20.861	22.035	-	0.092
0.58	0.284	-	0.405	0.405	7.72	-15.356	16.070	-	0.063
0.38	0.230	-	0.328	0.328	7.72	-2.908	2.975	-	0.014
0.18	0.158	-	0.225	0.225	7.72	-4.890	5.178	-	0.021
0.78	0.329	-	0.469	0.470	10.26	-10.538	11.591	-	0.041
0.58	0.284	-	0.405	0.405	10.26	-3.510	4.009	-	0.012
0.38	0.200	-	0.328	0.328	10.26	-12.887	13.032	-	0.055
0.18	0.158	-	0.225	0.225	10.26	-7.708	7.744	-	0.034

Hauptbegegnungswinkel 135°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.469	0.470	0.	-56.792	59.028	-	0.232
0.58	0.284	0.343	0.405	0.405	0.	-58.557	53.917	-	0.101
0.38	0.230	0.278	0.328	0.328	0.	-34.062	29.224	-	0.065
0.18	0.158	0.191	0.225	0.225	0.	-19.280	19.484	-	0.041
0.78	0.329	0.305	0.373	0.373	5.14	-53.726	47.072	-	0.246
0.58	0.284	0.263	0.322	0.322	5.14	-37.142	37.773	-	0.149
0.38	0.230	0.213	0.260	0.261	5.14	-31.893	28.514	-	0.086
0.18	0.158	0.146	0.179	0.279	5.14	-25.359	25.764	-	0.077
0.78	0.329	0.272	0.338	0.339	7.72	-13.014	16.071	-	0.031
0.58	0.284	0.235	0.291	0.292	7.72	-10.924	9.804	-	0.024
0.38	0.230	0.190	0.236	0.237	7.72	-4.452	4.281	-	0.014
0.18	0.158	0.131	0.162	0.163	7.72	-5.796	5.295	-	0.021
0.78	0.329	0.247	0.309	0.310	10.26	-1.906	1.848	-	0.009
0.58	0.284	0.213	0.267	0.268	10.26	-1.342	1.163	-	0.006
0.38	0.200	0.172	0.216	0.217	10.26	-1.808	1.754	-	0.008
0.18	0.158	0.118	0.148	0.149	10.26	-4.250	3.723	-	0.023

Hauptbegegnungswinkel 180°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.469	0.470	0.	-42.685	67.935	-	0.082
0.58	0.284	0.408	0.405	0.405	0.	< -90	> 90	3	0.175
0.38	0.230	0.331	0.328	0.328	0.	< -90	> 90	7	0.234
0.18	0.158	0.227	0.225	0.225	0.	< -90	> 90	5	0.087
0.78	0.329	0.347	0.343	0.344	5.14	-0.196	0.198	-	0.001
0.58	0.284	0.299	0.296	0.297	5.14	-0.208	0.196	-	0.001
0.38	0.230	0.242	0.240	0.241	5.14	-0.498	0.521	-	0.002
0.18	0.158	0.167	0.165	0.165	5.14	-1.295	1.298	-	0.005
0.78	0.329	0.306	0.302	0.303	7.72	-0.198	0.188	-	0.001
0.58	0.284	0.264	0.261	0.262	7.72	-0.251	0.230	-	0.001
0.38	0.230	0.214	0.211	0.212	7.72	-0.361	0.351	-	0.002
0.18	0.158	0.147	0.145	0.146	7.72	-0.337	0.313	-	0.002
0.78	0.329	0.274	0.271	0.272	10.26	-0.165	0.150	-	0.001
0.58	0.284	0.236	0.234	0.235	10.26	-0.157	0.186	-	0.001
0.38	0.200	0.191	0.189	0.190	10.26	-0.223	0.259	-	0.001
0.18	0.158	0.131	0.130	0.131	10.26	-0.425	0.376	-	0.002

Kennzeichnende Periode	$T_1$	=	7.592 s
Kennzeichnende Wellenhöhe	$WH_{1/3}$	=	8.5 m
Anzahl der Frequenzen	$NOM$	=	5
Anzahl der Begegnungswinkel	$NMUE$	=	5
Anzahl der Einzelwellen	$NWELLE$	=	25
Simulationszeit	$TMAX$	=	6000 s
Kopplung mit der Längsbewegung nicht berücksichtigt			

Hauptbegegnungswinkel 0°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.469	0.470	0.	-48.253	47.448	-	0.333
0.58	0.284	0.408	0.405	0.405	0.	-36.057	34.942	-	0.068
0.38	0.230	0.331	0.328	0.328	0.	-0.481	0.562	-	0.003
0.18	0.158	0.227	0.225	0.225	0.	-0.638	0.633	-	0.004
0.78	0.329	0.744	0.742	0.736	5.14	-2.487	2.652	-	0.018
0.58	0.284	0.643	0.640	0.635	5.14	-2.045	2.523	-	0.014
0.38	0.230	0.520	0.519	0.514	5.14	-19.525	18.799	-	0.130
0.18	0.158	0.357	0.356	0.353	5.14	< -90	> 90	47	0.327
0.78	0.329	1.045	1.045	1.036	7.72	-9.422	9.376	-	0.065
0.58	0.284	0.902	0.902	0.894	7.72	-19.885	20.692	-	0.138
0.38	0.230	0.730	0.730	0.724	7.72	< -90	> 90	9	0.234
0.18	0.158	0.502	0.502	0.497	7.72	< -90	> 90	11	0.236
0.78	0.329	1.744	1.768	1.721	10.26	-15.542	17.985	-	0.070
0.58	0.284	1.505	1.526	1.486	10.26	-27.168	34.082	-	0.114
0.38	0.200	1.219	1.236	1.203	10.26	< -90	> 90	17	0.240
0.18	0.158	0.837	0.849	0.827	10.26	-11.068	11.728	-	0.046

Hauptbegegnungswinkel 45°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.469	0.470	0.	-62.565	62.442	-	0.356
0.58	0.284	0.343	0.405	0.405	0.	-47.473	46.206	-	0.282
0.38	0.230	0.278	0.328	0.328	0.	-32.126	33.126	-	0.100
0.18	0.158	0.191	0.225	0.225	0.	-5.269	4.811	-	0.019
0.78	0.329	0.574	0.634	0.631	5.14	-20.195	20.268	-	0.008
0.58	0.284	0.495	0.547	0.545	5.14	< -90	> 90	14	0.303
0.38	0.230	0.401	0.443	0.441	5.14	< -90	> 90	53	0.385
0.18	0.158	0.275	0.304	0.303	5.14	< -90	> 90	71	0.368
0.78	0.329	0.737	0.769	0.762	7.72	-38.217	45.794	-	0.216
0.58	0.284	0.636	0.664	0.658	7.72	< -90	> 90	2	0.240
0.38	0.230	0.515	0.538	0.533	7.72	< -90	> 90	17	0.293
0.18	0.158	0.354	0.370	0.366	7.72	< -90	> 90	69	0.379
0.78	0.329	1.027	0.977	0.973	10.26	-37.669	> 90	2	0.205
0.58	0.284	0.887	0.843	0.840	10.26	-46.034	> 90	35	0.354
0.38	0.200	0.718	0.683	0.680	10.26	< -90	> 90	68	0.380
0.18	0.158	0.493	0.469	0.467	10.26	-44.619	> 90	3	0.225

### Hauptbegegnungswinkel 90°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	-	0.469	0.470	0.	-3.722	43.859	-	0.171
0.58	0.284	-	0.405	0.405	0.	-6/801	7.393	-	0.023
0.38	0.230	-	0.328	0.328	0.	-1.974	1.843	-	0.010
0.18	0.158	-	0.225	0.225	0.	-3.874	3.701	-	0.017
0.78	0.329	-	0.469	0.470	5.14	-38.953	43.516	-	0.176
0.58	0.284	-	0.405	0.405	5.14	-23.318	24.451	-	0.105
0.38	0.230	-	0.328	0.328	5.14	-2.462	2.467	-	0.013
0.18	0.158	-	0.225	0.225	5.14	-3.928	3.788	-	0.019
0.78	0.329	-	0.469	0.470	7.72	-19.097	19.012	-	0.091
0.58	0.284	-	0.405	0.405	7.72	-12.788	13.654	-	0.054
0.38	0.230	-	0.328	0.328	7.72	-4.629	4.358	-	0.017
0.18	0.158	-	0.225	0.225	7.72	-5.396	5.750	-	0.025
0.78	0.329	-	0.469	0.470	10.26	-8.211	8.542	-	0.027
0.58	0.284	-	0.405	0.405	10.26	-3.164	3.525	-	0.010
0.38	0.200	-	0.328	0.328	10.26	-17.911	16.447	-	0.065
0.18	0.158	-	0.225	0.225	10.26	-6.890	7.553	-	0.032

### Hauptbegegnungswinkel 135°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.469	0.470	0.	< -90	> 90	4	0.353
0.58	0.284	0.343	0.405	0.405	0.	< -90	60.412	1	0.320
0.38	0.230	0.278	0.328	0.328	0.	-43.784	54.241	-	0.163
0.18	0.158	0.191	0.225	0.225	0.	-41.155	28.450	-	0.083
0.78	0.329	0.305	0.373	0.373	5.14	-46.042	56.816	-	0.194
0.58	0.284	0.263	0.322	0.322	5.14	-30.000	34.888	-	0.093
0.38	0.230	0.213	0.260	0.261	5.14	-33.086	25.833	-	0.018
0.18	0.158	0.146	0.179	0.279	5.14	-23.487	23.826	-	0.046
0.78	0.329	0.272	0.338	0.339	7.72	-2.542	2.792	-	0.009
0.58	0.284	0.235	0.291	0.292	7.72	-4.115	4.973	-	0.012
0.38	0.230	0.190	0.236	0.237	7.72	-1.672	1.596	-	0.008
0.18	0.158	0.131	0.162	0.163	7.72	-2.774	2.327	-	0.011
0.78	0.329	0.247	0.309	0.310	10.26	-2.019	1.732	-	0.008
0.58	0.284	0.213	0.267	0.268	10.26	-1.161	1.190	-	0.006
0.38	0.200	0.172	0.216	0.217	10.26	-1.901	1.810	-	0.007
0.18	0.158	0.118	0.148	0.149	10.26	-3.539	3.157	-	0.016

### Hauptbegegnungswinkel 180°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.469	0.470	0.	-59.704	62.209	-	0.363
0.58	0.284	0.408	0.405	0.405	0.	-46.458	48.002	-	0.169
0.38	0.230	0.331	0.328	0.328	0.	-1.056	0.969	-	0.003
0.18	0.158	0.227	0.225	0.225	0.	-0.570	0.569	-	0.004
0.78	0.329	0.347	0.343	0.344	5.14	-0.159	0.160	-	0.001
0.58	0.284	0.299	0.296	0.297	5.14	-0.366	0.410	-	0.001
0.38	0.230	0.242	0.240	0.241	5.14	-0.408	0.396	-	0.002
0.18	0.158	0.167	0.165	0.165	5.14	-0.661	0.671	-	0.004
0.78	0.329	0.306	0.302	0.303	7.72	-0.177	0.158	-	0.001
0.58	0.284	0.264	0.261	0.262	7.72	-0.170	0.167	-	0.001
0.38	0.230	0.214	0.211	0.212	7.72	-0.183	0.179	-	0.001
0.18	0.158	0.147	0.145	0.146	7.72	-0.402	0.438	-	0.002
0.78	0.329	0.274	0.271	0.272	10.26	-0.135	0.130	-	0.001
0.58	0.284	0.236	0.234	0.235	10.26	-0.141	0.134	-	0.001
0.38	0.200	0.191	0.189	0.190	10.26	-0.218	0.233	-	0.001
0.18	0.158	0.131	0.130	0.131	10.26	-0.708	0.683	-	0.002

Kennzeichnende Periode	$T_1$	=	9.040 s
Kennzeichnende Wellenhöhe	$WH_{1/3}$	=	8.5 m
Anzahl der Frequenzen	$NOM$	=	5
Anzahl der Begegnungswinkel	$NMUE$	=	5
Anzahl der Einzelwellen	$NWELLE$	=	25
Simulationszeit	$TMAX$	=	6000 s
Kopplung mit der Längsbewegung berücksichtigt			

Hauptbegegnungswinkel 0°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	8	0.2821
0.58	0.284	0.408	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	15	0.336
0.38	0.230	0.331	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	8	0.353
0.18	0.158	0.227	0.269	0.268	0.	-38.818	> 90	2	0.152
0.78	0.329	0.744	0.809	0.804	5.14	-9.117	9.888	-	0.037
0.58	0.284	0.643	0.698	0.694	5.14	-4.173	4.526	-	0.022
0.38	0.230	0.520	0.565	0.562	5.14	-19.001	21.535	-	0.145
0.18	0.158	0.357	0.388	0.386	5.14	< -90	> 90	68	0.365
0.78	0.329	1.045	1.041	1.036	7.72	-12.797	14.520	-	0.087
0.58	0.284	0.902	0.899	0.894	7.72	-31.150	> 90	1	0.171
0.38	0.230	0.730	0.728	0.724	7.72	< -90	> 90	10	0.274
0.18	0.158	0.502	0.500	0.479	7.72	< -90	> 90	4	0.191
0.78	0.329	1.744	1.458	1.379	10.26	-18.971	21.274	-	0.079
0.58	0.284	1.505	1.258	1.188	10.26	-34.697	> 90	1	0.118
0.38	0.200	1.219	1.019	0.962	10.26	-34.586	> 90	1	0.156
0.18	0.158	0.837	0.700	0.661	10.26	-10.110	13.796	-	0.051

Hauptbegegnungswinkel 45°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.560	0.559	0.	-57.870	> 90	1	0.140
0.58	0.284	0.343	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	16	0.384
0.38	0.230	0.278	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	15	0.304
0.18	0.158	0.191	0.269	0.268	0.	< -90	> 90	9	0.233
0.78	0.329	0.574	0.715	0.713	5.14	-14.110	14.200	-	0.046
0.58	0.284	0.495	0.618	0.615	5.14	< -90	53.074	1	0.141
0.38	0.230	0.401	0.500	0.498	5.14	< -90	> 90	31	0.314
0.18	0.159	0.275	0.344	0.342	5.14	< -90	> 90	60	0.368
0.78	0.329	0.737	0.832	0.826	7.72	< -90	75.727	1	0.256
0.58	0.284	0.636	0.718	0.713	7.72	< -90	> 90	4	0.270
0.38	0.230	0.515	0.581	0.577	7.72	< -90	> 90	6	0.223
0.18	0.158	0.354	0.399	0.397	7.72	< -90	> 90	48	0.344
0.78	0.329	1.027	0.992	0.973	10.26	-41.262	> 90	2	0.194
0.58	0.284	0.887	0.856	0.840	10.26	-40.432	> 90	26	0.293
0.38	0.200	0.718	0.693	0.680	10.26	-42.683	> 90	46	0.345
0.18	0.158	0.493	0.476	0.476	10.26	-34.328	40.967	-	0.166

### Hauptbegegnungswinkel 90°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	-	0.560	0.559	0.	-33.060	31.784	-	0.154
0.58	0.284	-	0.483	0.483	0.	-38.199	36.585	-	0.157
0.38	0.230	-	0.391	0.391	0.	-29.110	26.736	-	0.069
0.18	0.158	-	0.269	0.268	0.	-4.982	5.373	-	0.018
0.78	0.329	-	0.560	0.559	5.14	-28.036	30.895	-	0.146
0.58	0.284	-	0.483	0.483	5.14	-39.935	43.535	-	0.188
0.38	0.230	-	0.391	0.391	5.14	-4.179	4.056	-	0.016
0.18	0.158	-	0.269	0.268	5.14	-4.270	4.585	-	0.021
0.78	0.329	-	0.560	0.559	7.72	-20.288	21.677	-	0.074
0.58	0.284	-	0.483	0.483	7.72	-22.279	23.766	-	0.112
0.38	0.230	-	0.391	0.391	7.72	-4.541	5.002	-	0.017
0.18	0.158	-	0.269	0.268	7.72	-5.034	4.986	-	0.027
0.78	0.329	-	0.560	0.559	10.26	-18.161	19.869	-	0.100
0.58	0.284	-	0.483	0.483	10.26	-13.134	13.335	-	0.039
0.38	0.200	-	0.391	0.391	10.26	-8.701	8.376	-	0.039
0.18	0.158	-	0.263	0.268	10.26	-5.441	4.609	-	0.026

### Hauptbegegnungswinkel 135°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.560	0.559	0.	< -90	56.297	1	0.241
0.58	0.284	0.343	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	4	0.215
0.38	0.230	0.278	0.391	0.391	0.	-41.160	> 90	1	0.114
0.18	0.158	0.191	0.269	0.268	0.	-30.635	29.110	-	0.048
0.78	0.329	0.305	0.459	0.460	5.14	< -90	> 90	11	0.379
0.58	0.284	0.263	0.397	0.397	5.14	< -90	> 90	5	0.324
0.38	0.230	0.213	0.321	0.321	5.14	< -90	> 90	4	0.264
0.18	0.158	0.146	0.221	0.221	5.14	< -90	53.237	1	0.179
0.78	0.329	0.272	0.422	0.422	7.72	< -90	> 90	8	0.381
0.58	0.284	0.235	0.364	0.364	7.72	< -90	> 90	7	0.296
0.38	0.230	0.190	0.295	0.295	7.72	< -90	> 90	3	0.237
0.18	0.158	0.131	0.202	0.203	7.72	-44.941	> 90	4	0.198
0.78	0.329	0.247	0.390	0.390	10.26	< -90	> 90	2	0.308
0.58	0.284	0.213	0.336	0.337	10.26	-51.873	52.078	-	0.229
0.38	0.200	0.172	0.272	0.273	10.26	-46.976	42.811	-	0.156
0.18	0.158	0.118	0.187	0.187	10.26	-32.391	38.021	-	0.130

### Hauptbegegnungswinkel 180°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	8	0.305
0.58	0.284	0.408	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	19	0.331
0.38	0.230	0.331	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	17	0.295
0.18	0.158	0.227	0.269	0.268	0.	< -90	> 90	10	0.184
0.78	0.329	0.347	0.428	0.428	5.14	< -90	> 90	2	0.320
0.58	0.284	0.299	0.369	0.370	5.14	-58.632	58.409	-	0.236
0.38	0.230	0.242	0.299	0.299	5.14	< -90	52.603	2	0.185
0.18	0.158	0.167	0.205	0.206	5.14	-43.763	44.148	-	0.164
0.78	0.329	0.306	0.383	0.383	7.72	-52.799	52.431	-	0.267
0.58	0.284	0.264	0.330	0.331	7.72	-51.040	49.789	-	0.185
0.38	0.230	0.214	0.267	0.268	7.72	-39.086	41.468	-	0.139
0.18	0.158	0.147	0.184	0.184	7.72	-33.776	37.081	-	0.099
0.78	0.329	0.274	0.346	0.347	10.26	-45.062	42.039	-	0.161
0.58	0.284	0.236	0.299	0.300	10.26	-40.171	37.664	-	0.112
0.38	0.200	0.191	0.242	0.243	10.26	-29.130	29.368	-	0.049
0.18	0.158	0.131	0.166	0.167	10.26	-6.251	6.559	-	0.016

Kennzeichnende Periode	$T_1$	=	9.040 s
Kennzeichnende Wellenhöhe	$WH_{1/3}$	=	8.5 m
Anzahl der Frequenzen	$NOM$	=	5
Anzahl der Begegnungswinkel	$NMUE$	=	5
Anzahl der Einzelwellen	$NWELLE$	=	25
Simulationszeit	$TMAX$	=	6000 s
Kopplung mit der Längsbewegung nicht berücksichtigt			

Hauptbegegnungswinkel 0°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	5	0.315
0.58	0.284	0.408	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	13	0.340
0.38	0.200	0.331	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	7	0.342
0.18	0.158	0.227	0.269	0.268	0.	< -90	> 90	3	0.180
0.78	0.329	0.744	0.809	0.804	5.14	-6.663	7.403	-	0.031
0.58	0.284	0.643	0.689	0.694	5.14	-3.892	4.134	-	0.020
0.38	0.230	0.520	0.565	0.562	5.14	-19.403	21.246	-	0.142
0.18	0.158	0.357	0.388	0.386	5.14	< -90	> 90	62	0.363
0.78	0.329	1.045	1.041	1.036	7.72	-12.163	10.850	-	0.083
0.58	0.284	0.902	0.899	0.894	7.72	< -90	> 90	3	0.200
0.38	0.230	0.730	0.728	0.724	7.72	< -90	38.458	8	0.309
0.18	0.158	0.502	0.500	0.479	7.72	< -90	> 90	3	0.188
0.78	0.329	1.744	1.458	1.379	10.26	-29.240	53.612	-	0.110
0.58	0.284	1.505	1.258	1.188	10.26	< -90	> 90	4	0.169
0.38	0.200	1.219	1.019	0.962	10.26	< -90	> 90	19	0.269
0.18	0.158	0.837	0.700	0.661	10.26	-16.086	21.832	-	0.065

Hauptbegegnungswinkel 45°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	5	0.316
0.58	0.284	0.343	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	5	0.346
0.38	0.230	0.278	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	5	0.320
0.18	0.158	0.191	0.269	0.268	0.	< -90	42.508	1	0.172
0.78	0.329	0.574	0.715	0.713	5.14	-11.611	11.465	-	0.065
0.58	0.284	0.495	0.618	0.615	5.14	-30.318	31.177	-	0.159
0.38	0.230	0.401	0.500	0.498	5.14	< -90	> 90	36	0.339
0.18	0.158	0.275	0.344	0.342	5.14	< -90	> 90	67	0.365
0.78	0.320	0.737	0.832	0.826	7.72	-42.936	> 90	1	0.216
0.58	0.284	0.636	0.718	0.713	7.72	< -90	> 90	3	0.243
0.38	0.230	0.515	0.581	0.577	7.72	-41.585	> 90	1	0.196
0.18	0.158	0.354	0.399	0.397	7.72	< -90	> 90	47	0.339
0.78	0.329	1.027	0.992	0.973	10.26	-42.397	> 90	1	0.178
0.58	0.284	0.887	0.856	0.840	10.26	< -90	> 90	25	0.305
0.38	0.200	0.718	0.693	0.680	10.26	-61.060	> 90	47	0.356
0.18	0.158	0.493	0.476	0.476	10.26	-42.652	61.405	-	0.173

### Hauptbegegnungswinkel 90°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	-	0.560	0.559	0.	-28.419	29.632	-	0.125
0.58	0.284	-	0.483	0.483	0.	-27.489	26.782	-	0.106
0.38	0.230	-	0.391	0.391	0.	-1.478	1.505	-	0.007
0.18	0.158	-	0.269	0.268	0.	-3.259	3.007	-	0.018
0.78	0.329	-	0.560	0.559	5.14	-35.150	34.990	-	0.151
0.58	0.284	-	0.483	0.483	5.14	-37.454	37.486	-	0.136
0.38	0.230	-	0.391	0.391	5.14	-10.540	10.037	-	0.023
0.18	0.158	-	0.269	0.268	5.14	-4.245	5.716	-	0.023
0.78	0.329	-	0.560	0.559	7.72	-20.856	21.623	-	0.072
0.58	0.284	-	0.483	0.483	7.72	-29.944	26.668	-	0.120
0.38	0.230	-	0.391	0.391	7.72	-6.506	6.711	-	0.024
0.18	0.158	-	0.269	0.268	7.72	-4.813	5.082	-	0.024
0.78	0.329	-	0.560	0.559	10.26	-17.486	17.874	-	0.095
0.58	0.284	-	0.483	0.483	10.26	-10.257	11.363	-	0.036
0.38	0.200	-	0.391	0.391	10.26	-12.475	12.408	-	0.042
0.18	0.158	-	0.269	0.268	10.26	-6.515	6.420	-	0.029

### Hauptbegegnungswinkel 135°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	8	0.347
0.58	0.284	0.343	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	19	0.331
0.38	0.230	0.278	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	15	0.308
0.18	0.158	0.191	0.269	0.268	0.	-50.855	> 90	4	0.202
0.78	0.329	0.305	0.459	0.460	5.14	< -90	> 90	13	0.389
0.58	0.284	0.263	0.397	0.397	5.14	< -90	> 90	7	0.339
0.38	0.230	0.213	0.321	0.321	5.14	< -90	> 90	5	0.268
0.18	0.158	0.146	0.221	0.221	5.14	< -90	> 90	4	0.196
0.78	0.329	0.272	0.422	0.422	7.72	< -90	> 90	3	0.341
0.58	0.284	0.235	0.364	0.364	7.72	< -90	58.174	1	0.282
0.38	0.230	0.190	0.295	0.295	7.72	-41.655	45.482	-	0.191
0.18	0.158	0.131	0.202	0.203	7.72	-46.475	47.207	-	0.153
0.78	0.329	0.247	0.390	0.390	10.26	-55.930	55.323	-	0.255
0.58	0.284	0.213	0.336	0.337	10.26	-47.381	51.717	-	0.181
0.38	0.200	0.172	0.272	0.273	10.26	-29.685	33.268	-	0.120
0.18	0.158	0.118	0.187	0.187	10.26	-29.523	36.140	-	0.104

Hauptbegegnungswinkel 180°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	12	0.303
0.58	0.284	0.408	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	19	0.331
0.38	0.230	0.331	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	15	0.286
0.18	0.158	0.227	0.269	0.268	0.	< -90	> 90	10	0.189
0.78	0.329	0.347	0.428	0.428	5.14	< -90	> 90	7	0.374
0.58	0.284	0.299	0.369	0.370	5.14	< -90	> 90	2	0.314
0.38	0.230	0.242	0.299	0.299	5.14	< -90	> 90	5	0.209
0.18	0.158	0.167	0.205	0.206	5.14	-46.630	> 90	3	0.173
0.78	0.329	0.306	0.383	0.383	7.72	-46.506	50.658	-	0.242
0.58	0.284	0.264	0.330	0.331	7.72	-42.543	47.932	-	0.158
0.38	0.230	0.214	0.267	0.268	7.72	-36.711	31.366	-	0.120
0.18	0.158	0.147	0.184	0.184	7.72	-29.361	30.263	-	0.088
0.78	0.329	0.274	0.346	0.347	10.26	-27.036	31.314	-	0.074
0.58	0.284	0.236	0.299	0.300	10.26	-8.180	7.837	-	0.018
0.38	0.200	0.191	0.242	0.243	10.26	-6.575	6.064	-	0.012
0.18	0.158	0.131	0.166	0.167	10.26	-5.136	4.980	-	0.010

Kennzeichnende Periode	$T_1$	=	12.642 s
Kennzeichnende Wellenhöhe	$WH_{1/3}$	=	8.5 m
Anzahl der Frequenzen	$NOM$	=	5
Anzahl der Begegnungswinkel	$NMUE$	=	5
Anzahl der Einzelwellen	$NWELLE$	=	25
Simulationszeit	$TMAX$	=	6000 s
Kopplung mit der Längsbewegung berücksichtigt			

Hauptbegegnungswinkel 0°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.781	0.782	0.	-15.616	14.357	-	0.041
0.58	0.284	0.408	0.675	0.675	0.	-20.053	19.828	-	0.071
0.38	0.230	0.331	0.546	0.547	0.	< -90	> 90	13	0.283
0.18	0.158	0.227	0.375	0.375	0.	< -90	> 90	16	0.238
0.78	0.329	0.744	1.003	1.000	5.14	-30.093	20.733	-	0.107
0.58	0.284	0.643	0.866	0.863	5.14	-6.297	6.839	-	0.030
0.38	0.230	0.520	0.701	0.699	5.14	-12.736	12.686	-	0.058
0.18	0.158	0.357	0.482	0.480	5.14	< -90	> 90	62	0.220
0.78	0.329	1.045	1.169	1.161	7.72	-10.184	8.922	-	0.061
0.58	0.284	0.902	1.009	1.003	7.72	-18.515	18.712	-	0.126
0.38	0.230	0.730	0.817	0.812	7.72	< -90	31.70	1	0.151
0.18	0.158	0.502	0.561	0.558	7.72	-38.297	30.872	-	0.119
0.78	0.329	1.744	1.398	1.376	10.26	-6.367	6.940	-	0.037
0.58	0.284	1.505	1.207	1.188	10.26	-9.657	12.386	-	0.065
0.38	0.200	1.219	0.977	0.962	10.26	-19.773	> 90	1	0.124
0.18	0.158	0.837	0.671	0.661	10.26	-6.781	6.508	-	0.031

Hauptbegegnungswinkel 45°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.781	0.782	0.	-17.369	22.394	-	0.091
0.58	0.284	0.343	0.675	0.675	0.	-17.690	21.002	-	0.084
0.38	0.230	0.278	0.546	0.547	0.	-39.578	> 90	1	0.144
0.18	0.158	0.191	0.375	0.375	0.	< -90	> 90	10	0.188
0.78	0.329	0.574	0.926	0.924	5.14	-18.059	21.458	-	0.120
0.58	0.284	0.495	0.799	0.798	5.14	-6.598	6.368	-	0.027
0.38	0.230	0.401	0.647	0.646	5.14	-17.553	20.103	6	0.093
0.18	0.158	0.275	0.445	0.444	5.14	< -90	> 90	7	0.251
0.78	0.329	0.737	1.020	1.017	7.72	-18.961	27.093	-	0.144
0.58	0.284	0.636	0.881	0.878	7.72	-19.289	40.904	-	0.165
0.38	0.230	0.515	0.713	0.711	7.72	-14.256	13.754	-	0.047
0.18	0.158	0.354	0.490	0.488	7.72	-32.439	36.504	-	0.158
0.78	0.329	1.027	1.136	1.129	10.26	-14.683	18.869	-	0.107
0.58	0.284	0.887	0.980	0.974	10.26	-19.705	24.165	-	0.145
0.38	0.200	0.718	0.794	0.789	10.26	-38.691	55.575	-	0.215
0.18	0.158	0.493	0.545	0.542	10.26	-8.486	9.213	-	0.046

Hauptbegegnungswinkel 90°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	-	0.781	0.782	0.	-2.762	3.095	-	0.015
0.58	0.284	-	0.675	0.675	0.	-1.183	1.346	-	0.007
0.38	0.230	-	0.546	0.547	0.	-1.493	1.606	-	0.006
0.18	0.158	-	0.375	0.375	0.	-1.116	1.039	-	0.004
0.78	0.329	-	0.781	0.782	5.14	-3.283	2.918	-	0.015
0.58	0.284	-	0.675	0.675	5.14	-1.574	1.741	-	0.007
0.38	0.230	-	0.546	0.547	5.14	-0.600	0.520	-	0.003
0.18	0.158	-	0.375	0.375	5.14	-1.286	1.030	-	0.005
0.78	0.329	-	0.781	0.782	7.72	-3.398	3.553	-	0.015
0.58	0.284	-	0.483	0.675	7.72	-1.301	1.271	-	0.007
0.38	0.230	-	0.546	0.547	7.72	-0.586	0.574	-	0.003
0.18	0.158	-	0.375	0.375	7.72	-1.378	1.064	-	0.006
0.78	0.329	-	0.781	0.782	10.26	-3.201	3.311	-	0.018
0.58	0.284	-	0.675	0.675	10.26	-1.598	1.595	-	0.008
0.38	0.200	-	0.546	0.547	10.26	-1.059	0.976	-	0.0005
0.18	0.158	-	0.375	0.375	10.26	-1.760	1.448	-	0.008

Hauptbegegnungswinkel 135°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.781	0.782	0.	-24.747	27.020	-	0.113
0.58	0.284	0.343	0.675	0.675	0.	-37.520	39.555	-	0.159
0.38	0.230	0.278	0.546	0.547	0.	-51.888	> 90	3	0.215
0.18	0.158	0.191	0.375	0.375	0.	-1.822	1.875	-	0.009
0.78	0.329	0.305	0.676	0.677	5.14	-41.128	42.081	-	0.190
0.58	0.284	0.263	0.584	0.584	5.14	< -90	> 90	2	0.245
0.38	0.230	0.213	0.473	0.473	5.14	< -90	50.767	3	0.226
0.18	0.158	0.146	0.325	0.325	5.14	-8.240	8.263	-	0.024
0.78	0.329	0.272	0.633	0.634	7.72	-51.124	48.042	-	0.191
0.58	0.284	0.235	0.547	0.548	7.72	< -90	58.174	2	0.216
0.38	0.230	0.190	0.443	0.443	7.72	-44.781	> 90	1	0.243
0.18	0.158	0.131	0.304	0.305	7.72	-37.212	31.045	-	0.074
0.78	0.329	0.247	0.596	0.597	10.26	< -90	56.034	2	0.258
0.58	0.284	0.213	0.514	0.516	10.26	-60.287	> 90	2	0.145
0.38	0.200	0.172	0.416	0.418	10.26	< 90	> 90	4	0.207
0.18	0.158	0.118	0.286	0.284	10.26	-10.835	10.001	-	0.030

### Hauptbegegnungswinkel 180°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.781	0.782	0.	-48.612	49.970	-	0.169
0.58	0.284	0.408	0.675	0.675	0.	< -90	54.348	5	0.239
0.38	0.230	0.331	0.546	0.547	0.	< -90	> 90	17	0.288
0.18	0.158	0.227	0.375	0.375	0.	< -90	> 90	12	0.204
0.78	0.329	0.347	0.640	0.641	5.14	< -90	> 90	5	0.320
0.58	0.284	0.299	0.553	0.554	5.14	< -90	> 90	10	0.312
0.38	0.230	0.242	0.448	0.448	5.14	< -90	> 90	14	0.251
0.18	0.158	0.167	0.307	0.308	5.14	< -90	> 90	5	0.190
0.78	0.329	0.306	0.587	0.588	7.72	< -90	> 90	6	0.297
0.58	0.284	0.264	0.507	0.508	7.72	< -90	> 90	7	0.321
0.38	0.230	0.214	0.410	0.411	7.72	< -90	> 90	10	0.273
0.18	0.158	0.147	0.282	0.283	7.72	-49.045	> 90	1	0.206
0.78	0.329	0.274	0.542	0.544	10.26	< -90	> 90	7	0.329
0.58	0.284	0.236	0.468	0.470	10.26	< -90	> 90	9	0.293
0.38	0.200	0.191	0.379	0.380	10.26	< -90	> 90	8	0.380
0.18	0.158	0.131	0.260	0.261	10.26	< -90	> 90	2	0.225

Kennzeichnende Periode	$T_1$	=	12.642 s
Kennzeichnende Wellenhöhe	$WH_{1/3}$	=	8.5 m
Anzahl der Frequenzen	$NOM$	=	5
Anzahl der Begegnungswinkel	$NMUE$	=	5
Anzahl der Einzelwellen	$NWELLE$	=	25
Simulationszeit	$TMAX$	=	6000 s
Kopplung mit der Längsbewegung nicht berücksichtigt			

Hauptbegegnungswinkel 0°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.781	0.782	0.	-9.770	9.307	-	0.053
0.58	0.284	0.408	0.675	0.675	0.	-33.270	30.997	-	0.182
0.38	0.230	0.331	0.546	0.547	0.	< -90	> 90	17	0.292
0.18	0.158	0.227	0.375	0.375	0.	< -90	> 90	16	0.258
0.78	0.329	0.744	1.003	1.000	5.14	-18.741	18.716	-	0.104
0.58	0.284	0.643	0.866	0.863	5.14	-5.580	5.341	-	0.025
0.38	0.230	0.520	0.701	0.699	5.14	-11.609	10.609	-	0.058
0.18	0.158	0.357	0.482	0.480	5.14	< -90	> 90	32	0.220
0.78	0.329	1.045	1.169	1.161	7.72	-10.396	8.898	-	0.063
0.58	0.284	0.902	1.009	1.003	7.72	-18.791	190.58	-	0.133
0.38	0.230	0.730	0.817	0.812	7.72	-33.876	40.069	-	0.148
0.18	0.158	0.502	0.561	0.558	7.72	-18.652	20.475	-	0.108
0.78	0.329	1.744	1.398	1.376	10.26	-6.449	7.050	-	0.033
0.58	0.284	1.505	1.207	1.188	10.26	-8.945	9.628	-	0.057
0.38	0.200	1.219	0.977	0.962	10.26	-18.395	17.357	1	0.107
0.18	0.158	0.837	0.671	0.661	10.26	-6.759	7.252	-	0.032

Hauptbegegnungswinkel 45°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.781	0.782	0.	-7.076	7.436	-	0.037
0.58	0.284	0.343	0.675	0.675	0.	-21.518	25.566	-	0.147
0.38	0.230	0.278	0.546	0.547	0.	< -90	> 90	-	0.284
0.18	0.158	0.191	0.375	0.375	0.	< -90	> 90	-	0.218
0.78	0.329	0.574	0.926	0.924	5.14	-15.549	17.517	-	0.109
0.58	0.284	0.495	0.799	0.798	5.14	-4.842	4.550	-	0.025
0.38	0.230	0.401	0.647	0.646	5.14	-14.442	15.165	-	0.089
0.18	0.158	0.275	0.445	0.444	5.14	< -90	> 90	6	0.261
0.78	0.329	0.737	1.020	1.017	7.72	-18.382	23.284	-	0.142
0.58	0.284	0.636	0.881	0.878	7.72	-20.401	26.053	-	0.147
0.38	0.230	0.515	0.713	0.711	7.72	-9.147	8.008	-	0.040
0.18	0.158	0.354	0.490	0.488	7.72	-24.332	26.304	-	0.152
0.78	0.329	1.027	1.136	1.129	10.26	-16.515	19.465	-	0.113
0.58	0.284	0.887	0.980	0.974	10.26	-20.747	26.562	-	0.164
0.38	0.200	0.718	0.794	0.789	10.26	-37.729	> 90	-	0.259
0.18	0.158	0.493	0.545	0.542	10.26	-9.248	10.788	-	0.052

Hauptbegegnungswinkel 90°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	-	0.781	0.782	0.	-3.208	3.354	-	0.015
0.58	0.284	-	0.675	0.675	0.	-1.410	1.651	-	0.007
0.38	0.230	-	0.546	0.547	0.	-0.522	0.549	-	0.002
0.18	0.158	-	0.375	0.375	0.	-1.115	1.040	-	0.004
0.78	0.329	-	0.781	0.782	5.14	-3.252	3.259	-	0.015
0.58	0.284	-	0.675	0.675	5.14	-1.592	1.768	-	0.007
0.38	0.230	-	0.546	0.547	5.14	-0.616	0.569	-	0.003
0.18	0.158	-	0.375	0.375	5.14	-1.067	1.028	-	0.005
0.78	0.329	-	0.781	0.782	7.72	-3.267	3.525	-	0.015
0.58	0.284	-	0.483	0.675	7.72	-1.344	1.379	-	0.007
0.38	0.230	-	0.546	0.547	7.72	-0.589	0.553	-	0.003
0.18	0.158	-	0.375	0.375	7.72	-1.214	1.043	-	0.006
0.78	0.329	-	0.781	0.782	10.26	-3.295	3.5411	-	0.017
0.58	0.284	-	0.675	0.675	10.26	-1.590	1.505	-	0.008
0.38	0.200	-	0.546	0.547	10.26	-0.896	0.912	-	0.0005
0.18	0.158	-	0.375	0.375	10.26	-1.813	1.491	-	0.008

Hauptbegegnungswinkel 135°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.781	0.782	0.	-5.640	5.898	-	0.029
0.58	0.284	0.343	0.675	0.675	0.	-20.858	21.122	-	0.137
0.38	0.230	0.278	0.546	0.547	0.	-50.499	> 90	5	0.254
0.18	0.158	0.191	0.375	0.375	0.	< -90	> 90	4	0.137
0.78	0.329	0.305	0.676	0.677	5.14	-38.165	44.698	-	0.181
0.58	0.284	0.263	0.584	0.584	5.14	< -90	59.839	1	0.250
0.38	0.230	0.213	0.473	0.473	5.14	< -90	> 90	3	0.233
0.18	0.158	0.146	0.325	0.325	5.14	-7.838	8.213	-	0.026
0.78	0.329	0.272	0.633	0.634	7.72	-54.339	53.091	-	0.218
0.58	0.284	0.235	0.547	0.548	7.72	-52.839	> 90	1	0.225
0.38	0.230	0.190	0.443	0.443	7.72	< -90	> 90	4	0.226
0.18	0.158	0.131	0.304	0.305	7.72	-45.766	> 90	1	0.146
0.78	0.329	0.247	0.596	0.597	10.26	< -90	50.378	1	0.238
0.58	0.284	0.213	0.514	0.516	10.26	< -90	62.709	5	0.268
0.38	0.200	0.172	0.416	0.418	10.26	< -90	> 90	2	0.258
0.18	0.158	0.118	0.286	0.284	10.26	-40.643	51.428	-	0.166

### Hauptbegegnungswinkel 180°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.781	0.782	0.	-9.871	10.116	-	0.054
0.58	0.284	0.408	0.675	0.675	0.	< -90	> 90	2	0.193
0.38	0.230	0.331	0.546	0.547	0.	< -90	> 90	19	0.300
0.18	0.158	0.227	0.375	0.375	0.	< -90	> 90	17	0.251
0.78	0.329	0.347	0.640	0.641	5.14	< -90	> 90	10	0.302
0.58	0.284	0.299	0.553	0.554	5.14	< -90	> 90	11	0.303
0.38	0.230	0.242	0.448	0.448	5.14	< -90	> 90	14	0.272
0.18	0.158	0.167	0.307	0.308	5.14	< -90	> 90	9	0.186
0.78	0.329	0.306	0.587	0.588	7.72	< -90	43.061	6	0.323
0.58	0.284	0.264	0.507	0.508	7.72	< -90	> 90	10	0.338
0.38	0.230	0.214	0.410	0.411	7.72	< -90	> 90	14	0.272
0.18	0.158	0.147	0.282	0.283	7.72	< -90	> 90	6	0.243
0.78	0.329	0.274	0.542	0.544	10.26	< -90	> 90	7	0.289
0.58	0.284	0.236	0.468	0.470	10.26	< -90	> 90	6	0.308
0.38	0.200	0.191	0.379	0.380	10.26	< -90	> 90	7	0.297
0.18	0.158	0.131	0.260	0.261	10.26	< -90	> 90	4	0.217

Kennzeichnende Periode	$T_1$	=	9.040 s
Kennzeichnende Wellenhöhe	$WH_{1/3}$	=	6.0 m
Anzahl der Frequenzen	$NOM$	=	5
Anzahl der Begegnungswinkel	$NMUE$	=	5
Anzahl der Einzelwellen	$NWELLE$	=	25
Simulationszeit	$TMAX$	=	6000 s
Kopplung mit der Längsbewegung berücksichtigt			

Hauptbegegnungswinkel 0°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	4	0.321
0.58	0.284	0.408	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	12	0.337
0.38	0.230	0.331	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	7	0.297
0.18	0.158	0.227	0.269	0.268	0.	-44.782	44.718	-	0.203
0.78	0.329	0.744	0.809	0.804	5.14	-4.497	4.667	-	0.021
0.58	0.284	0.643	0.698	0.694	5.14	-2.746	2.788	-	0.014
0.38	0.230	0.520	0.565	0.562	5.14	-19.635	239.394	-	0.145
0.18	0.158	0.357	0.388	0.386	5.14	< -90	> 90	56	0.343
0.78	0.329	1.045	1.041	1.036	7.72	-12.110	9.511	-	0.069
0.58	0.284	0.902	0.899	0.894	7.72	< -90	42.160	2	0.171
0.38	0.230	0.730	0.728	0.724	7.72	< -90	> 90	3	0.232
0.18	0.158	0.502	0.500	0.479	7.72	< -90	> 90	2	0.149
0.78	0.329	1.744	1.458	1.376	10.26	-13.383	13.989	-	0.059
0.58	0.284	1.505	1.258	1.188	10.26	-18.793	20.635	-	0.093
0.38	0.200	1.219	1.019	0.962	10.26	-36.642	> 90	3	0.161
0.18	0.158	0.837	0.700	0.661	10.26	-11.153	16.234	-	0.038

Hauptbegegnungswinkel 45°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.560	0.559	0.	-53.405	58.166	-	0.141
0.58	0.284	0.343	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	9	0.346
0.38	0.230	0.278	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	9	0.260
0.18	0.158	0.191	0.269	0.268	0.	< -90	> 90	6	0.210
0.78	0.329	0.574	0.715	0.713	5.14	-10.569	10.501	-	0.056
0.58	0.284	0.495	0.618	0.615	5.14	-28.186	30.826	-	0.150
0.38	0.230	0.401	0.500	0.498	5.14	< -90	> 90	29	0.344
0.18	0.158	0.275	0.344	0.342	5.14	< -90	> 90	56	0.332
0.78	0.329	0.737	0.832	0.826	7.72	-31.688	44.290	-	0.179
0.58	0.284	0.636	0.718	0.713	7.72	< -90	56.891	1	0.195
0.38	0.230	0.515	0.581	0.577	7.72	< -90	> 90	3	0.189
0.18	0.158	0.354	0.399	0.397	7.72	< -90	> 90	42	0.337
0.78	0.329	1.027	0.992	0.973	10.26	-20.539	27.505	-	0.132
0.58	0.284	0.887	0.856	0.840	10.26	-54.317	> 90	8	0.269
0.38	0.200	0.718	0.693	0.680	10.26	< -90	> 90	25	0.320
0.18	0.158	0.493	0.476	0.476	10.26	-22.475	25.681	-	0.122

Hauptbegegnungswinkel 90°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	-	0.560	0.559	0.	-15.929	16.037	-	0.041
0.58	0.284	-	0.483	0.483	0.	-1.059	0.971	-	0.003
0.38	0.230	-	0.391	0.391	0.	-1.043	1.007	-	0.005
0.18	0.158	-	0.269	0.268	0.	-1.931	1.685	-	0.010
0.78	0.329	-	0.560	0.559	5.14	-24.370	26.396	-	0.130
0.58	0.284	-	0.483	0.483	5.14	-16.646	15.876	-	0.060
0.38	0.230	-	0.391	0.391	5.14	-1.470	1.351	-	0.007
0.18	0.158	-	0.269	0.268	5.14	-2.724	2.666	-	0.014
0.78	0.329	-	0.560	0.559	7.72	-9.763	9.429	-	0.043
0.58	0.284	-	0.483	0.483	7.72	-9.750	9.434	-	0.035
0.38	0.230	-	0.391	0.391	7.72	-1.478	1.405	-	0.007
0.18	0.158	-	0.269	0.268	7.72	-2.709	2.740	-	0.010
0.78	0.329	-	0.560	0.559	10.26	-2.923	2.798	-	0.011
0.58	0.284	-	0.483	0.483	10.26	-9.136	8.861	-	0.033
0.38	0.200	-	0.391	0.391	10.26	-4.652	4.691	-	0.018
0.18	0.158	-	0.269	0.268	10.26	-3.626	3.216	-	0.017

Hauptbegegnungswinkel 135°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	3	0.322
0.58	0.284	0.343	0.483	0.483	0.	-63.957	> 90	2	0.247
0.38	0.230	0.278	0.391	0.391	0.	-48.474	> 90	2	0.181
0.18	0.158	0.191	0.269	0.268	0.	-26.956	39.643	-	0.045
0.78	0.329	0.305	0.459	0.460	5.14	-60.929	61.664	-	0.330
0.58	0.284	0.263	0.397	0.397	5.14	-45.186	54.576	-	0.251
0.38	0.230	0.213	0.321	0.321	5.14	-39.229	43.201	-	0.100
0.18	0.158	0.146	0.221	0.221	5.14	-31.511	25.239	-	0.084
0.78	0.329	0.272	0.422	0.422	7.72	-55.131	60.184	-	0.293
0.58	0.284	0.235	0.364	0.364	7.72	-45.146	46.685	-	0.218
0.38	0.230	0.190	0.295	0.295	7.72	-30.928	27.906	-	0.108
0.18	0.158	0.131	0.202	0.203	7.72	-23.672	18.192	-	0.084
0.78	0.329	0.247	0.390	0.390	10.26	-35.496	36.133	-	0.162
0.58	0.284	0.213	0.336	0.337	10.26	-20.405	22.120	-	0.054
0.38	0.200	0.172	0.272	0.273	10.26	-9.842	8.529	-	0.022
0.18	0.158	0.118	0.187	0.187	10.26	-6.452	7.185	-	0.025

### Hauptbegegnungswinkel 180°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	10	0.309
0.58	0.284	0.408	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	18	0.293
0.38	0.230	0.331	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	14	0.299
0.18	0.158	0.227	0.269	0.268	0.	< -90	> 90	6	0.224
0.78	0.329	0.347	0.428	0.428	5.14	-55.505	49.463	-	0.304
0.58	0.284	0.299	0.369	0.370	5.14	-51.217	54.616	-	0.181
0.38	0.230	0.242	0.299	0.299	5.14	-41.167	34.344	-	0.111
0.18	0.158	0.167	0.205	0.206	5.14	-30.870	30.609	-	0.114
0.78	0.329	0.306	0.383	0.383	7.72	-41.325	39.775	-	0.150
0.58	0.284	0.264	0.330	0.331	7.72	-24.715	23.117	-	0.048
0.38	0.230	0.214	0.267	0.268	7.72	-22.001	15.019	-	0.047
0.18	0.158	0.147	0.184	0.184	7.72	-12.018	9.682	-	0.023
0.78	0.329	0.274	0.346	0.347	10.26	-0.223	0.280	-	0.001
0.58	0.284	0.236	0.299	0.300	10.26	-0.266	0.267	-	0.001
0.38	0.200	0.191	0.242	0.243	10.26	-0.270	0.267	-	0.001
0.18	0.158	0.131	0.166	0.167	10.26	-0.417	0.363	-	0.002

Kennzeichnende Periode	$T_1$	=	9.040 s
Kennzeichnende Wellenhöhe	$WH_{1/3}$	=	6.0 m
Anzahl der Frequenzen	$NOM$	=	5
Anzahl der Begegnungswinkel	$NMUE$	=	5
Anzahl der Einzelwellen	$NWELLE$	=	25
Simulationszeit	$TMAX$	=	6000 s
Kopplung mit der Längsbewegung nicht berücksichtigt			

Hauptbegegnungswinkel  $0^\circ$

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [ $^\circ$ ]	$\varphi_{max}$ [ $^\circ$ ]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	2	0.326
0.58	0.284	0.408	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	10	0.324
0.38	0.230	0.331	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	9	0.277
0.18	0.158	0.227	0.269	0.268	0.	< -90	41.988	1	0.169
0.78	0.329	0.744	0.809	0.804	5.14	-3.996	4.369	-	0.020
0.58	0.284	0.643	0.698	0.694	5.14	-2.682	2.717	-	0.014
0.38	0.230	0.520	0.565	0.562	5.14	-19.150	21.901	-	0.143
0.18	0.158	0.357	0.388	0.386	5.14	< -90	> 90	61	0.345
0.78	0.329	1.045	1.041	1.036	7.72	-10.016	9.079	-	0.067
0.58	0.284	0.902	0.899	0.894	7.72	< -90	28.362	1	0.161
0.38	0.230	0.730	0.728	0.724	7.72	< -90	> 90	4	0.269
0.18	0.158	0.502	0.500	0.479	7.72	< -90	47.722	1	0.158
0.78	0.329	1.744	1.458	1.376	10.26	-14.718	15.660	-	0.082
0.58	0.284	1.505	1.258	1.188	10.26	-37.748	34.597	-	0.124
0.38	0.200	1.219	1.019	0.962	10.26	< -90	41.988	9	0.212
0.18	0.158	0.837	0.700	0.661	10.26	-11.175	15.164	-	0.045

Hauptbegegnungswinkel  $45^\circ$

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [ $^\circ$ ]	$\varphi_{max}$ [ $^\circ$ ]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.560	0.559	0.	-61.626	> 90	1	0.332
0.58	0.284	0.343	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	4	0.347
0.38	0.230	0.278	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	4	0.306
0.18	0.158	0.191	0.269	0.268	0.	-40.449	44.357	-	0.144
0.78	0.329	0.574	0.715	0.713	5.14	-10.958	10.956	-	0.072
0.58	0.284	0.495	0.618	0.615	5.14	-24.410	26.825	-	0.144
0.38	0.230	0.401	0.500	0.498	5.14	< -90	> 90	31	0.329
0.18	0.158	0.275	0.344	0.342	5.14	< -90	> 90	54	0.356
0.78	0.329	0.737	0.832	0.826	7.72	-32.493	44.698	-	0.165
0.58	0.284	0.636	0.718	0.713	7.72	-51.541	> 90	1	0.190
0.38	0.230	0.515	0.581	0.577	7.72	-44.889	> 90	1	0.179
0.18	0.158	0.354	0.399	0.397	7.72	< -90	> 90	44	0.338
0.78	0.329	1.027	0.992	0.973	10.26	-26.658	33.822	-	0.133
0.58	0.284	0.887	0.856	0.840	10.26	-39.326	> 90	14	0.263
0.38	0.200	0.718	0.693	0.680	10.26	-42.812	> 90	23	0.288
0.18	0.158	0.493	0.476	0.476	10.26	-26.185	31.385	-	0.120

Hauptbegegnungswinkel 90°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	-	0.560	0.559	0.	-15.541	14.360	-	0.048
0.58	0.284	-	0.483	0.483	0.	-0.709	0.751	-	0.003
0.38	0.230	-	0.391	0.391	0.	-1.042	1.004	-	0.005
0.18	0.158	-	0.269	0.268	0.	-2.086	2.107	-	0.011
0.78	0.329	-	0.560	0.559	5.14	-21.307	22.262	-	0.083
0.58	0.284	-	0.483	0.483	5.14	27.978	27.850	-	0.057
0.38	0.230	-	0.391	0.391	5.14	-1.491	1.400	-	0.007
0.18	0.158	-	0.269	0.268	5.14	-2.423	2.094	-	0.012
0.78	0.329	-	0.560	0.559	7.72	-13.289	13.245	-	0.046
0.58	0.284	-	0.483	0.483	7.72	-11.401	11.186	-	0.042
0.38	0.230	-	0.391	0.391	7.72	-1.589	1.413	-	0.007
0.18	0.158	-	0.269	0.268	7.72	-2.513	2.502	-	0.011
0.78	0.329	-	0.560	0.559	10.26	-4.763	4.532	-	0.018
0.58	0.284	-	0.483	0.483	10.26	-9.345	9.466	-	0.027
0.38	0.200	-	0.391	0.391	10.26	-5.757	5.386	-	0.021
0.18	0.158	-	0.269	0.268	10.26	-3.776	4.977	-	0.017

Hauptbegegnungswinkel 135°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.398	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	7	0.326
0.58	0.284	0.343	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	14	0.316
0.38	0.230	0.278	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	9	0.271
0.18	0.158	0.191	0.269	0.268	0.	< -90	40.142	1	0.144
0.78	0.329	0.305	0.459	0.460	5.14	-58.741	63.031	-	0.354
0.58	0.284	0.263	0.397	0.397	5.14	-50.532	52.095	-	0.258
0.38	0.230	0.213	0.321	0.321	5.14	-43.547	49.963	-	0.156
0.18	0.158	0.146	0.221	0.221	5.14	-36.315	37.424	-	0.097
0.78	0.329	0.272	0.422	0.422	7.72	-51.046	52.013	-	0.252
0.58	0.284	0.235	0.364	0.364	7.72	-41.471	38.139	-	0.166
0.38	0.230	0.190	0.295	0.295	7.72	-21.451	22.368	-	0.081
0.18	0.158	0.131	0.202	0.203	7.72	-17.252	17.748	-	0.045
0.78	0.329	0.247	0.390	0.390	10.26	-28.852	31.460	-	0.119
0.58	0.284	0.213	0.336	0.337	10.26	-4.972	4.974	-	0.018
0.38	0.200	0.172	0.272	0.273	10.26	-7.703	7.571	-	0.023
0.18	0.158	0.118	0.187	0.187	10.26	-4.954	5.664	-	0.014

### Hauptbegegnungswinkel 180°

$\overline{GM}$ [m]	$\omega_\varphi$ [ $\frac{1}{s}$ ]	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e1}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e2}}$	$\frac{\omega_\varphi}{\omega_{e3}}$	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$\varphi_{min}$ [°]	$\varphi_{max}$ [°]	Anzahl der Kenterungen	Streuung von $\varphi$
0.78	0.329	0.473	0.560	0.559	0.	< -90	> 90	8	0.294
0.58	0.284	0.408	0.483	0.483	0.	< -90	> 90	18	0.306
0.38	0.230	0.331	0.391	0.391	0.	< -90	> 90	13	0.275
0.18	0.158	0.227	0.269	0.268	0.	< -90	> 90	4	0.190
0.78	0.329	0.347	0.428	0.428	5.14	-54.678	50.036	-	0.339
0.58	0.284	0.299	0.369	0.370	5.14	-49.226	47.016	-	0.224
0.38	0.230	0.242	0.299	0.299	5.14	-41.100	50.497	-	0.123
0.18	0.158	0.167	0.205	0.206	5.14	-33.884	26.950	-	0.099
0.78	0.329	0.306	0.383	0.383	7.72	-34.807	38.448	-	0.120
0.58	0.284	0.264	0.330	0.331	7.72	-17.147	17.748	-	0.030
0.38	0.230	0.214	0.267	0.268	7.72	-13.107	15.577	-	0.032
0.18	0.158	0.147	0.184	0.184	7.72	-5.207	5.332	-	0.013
0.78	0.329	0.274	0.346	0.347	10.26	-0.234	0.240	-	0.001
0.58	0.284	0.236	0.299	0.300	10.26	-0.267	0.274	-	0.001
0.38	0.200	0.191	0.242	0.243	10.26	-0.329	0.377	-	0.001
0.18	0.158	0.131	0.166	0.167	10.26	-0.318	0.338	-	0.001

## B Anhang B

Kennzeichnende Wellenhöhe = 8.5m Kennzeichnende Periode = 7.592s						
Längsbewegungen berücksichtigt?	Haupt- begegnungs- winkel [°]	$\overline{GM}$ [m]	Geschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]			
			0.00	5.14	7.72	10.26
ja	0	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	4	8
		0.18	-	47	11	-
nein	0	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	5	17
		0.18	-	47	9	-
ja	45	0.78	2	-	2	3
		0.58	8	13	5	18
		0.38	7	55	23	50
		0.18	4	67	69	2
nein	45	0.78	-	-	-	2
		0.58	-	14	2	35
		0.38	-	53	17	68
		0.18	-	71	69	3
ja	90	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
nein	90	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
ja	135	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
nein	135	0.78	4	-	-	-
		0.58	1	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
ja	180	0.78	-	-	-	-
		0.58	3	-	-	-
		0.38	7	-	-	-
		0.18	5	-	-	-
nein	180	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-

Kennzeichnende Wellenhöhe = 8.5m						
Kennzeichnende Periode = 9.040s						
Längsbewegungen berücksichtigt?	Haupt- begegnungs- winkel [°]	$\overline{GM}$ [m]	Geschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]			
			0.00	5.14	7.72	10.26
ja	0	0.78	8	-	-	-
		0.58	15	-	1	1
		0.38	8	-	10	1
		0.18	2	68	4	-
nein	0	0.78	5	-	-	-
		0.58	13	-	3	4
		0.38	7	-	8	19
		0.18	3	62	3	-
ja	45	0.78	1	-	1	2
		0.58	16	1	4	26
		0.38	15	31	6	46
		0.18	9	60	48	-
nein	45	0.78	5	-	1	1
		0.58	5	-	3	25
		0.38	5	36	1	47
		0.18	1	67	47	-
ja	90	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
nein	90	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
ja	135	0.78	1	11	8	2
		0.58	4	5	7	-
		0.38	1	4	3	-
		0.18	-	1	4	-
nein	135	0.78	8	13	1	-
		0.58	19	7	-	-
		0.38	15	5	-	-
		0.18	4	4	-	-
ja	180	0.78	8	2	-	-
		0.58	19	-	-	-
		0.38	17	2	-	-
		0.18	10	-	-	-
nein	180	0.78	12	7	-	-
		0.58	19	2	-	-
		0.38	15	5	-	-
		0.18	10	3	-	-

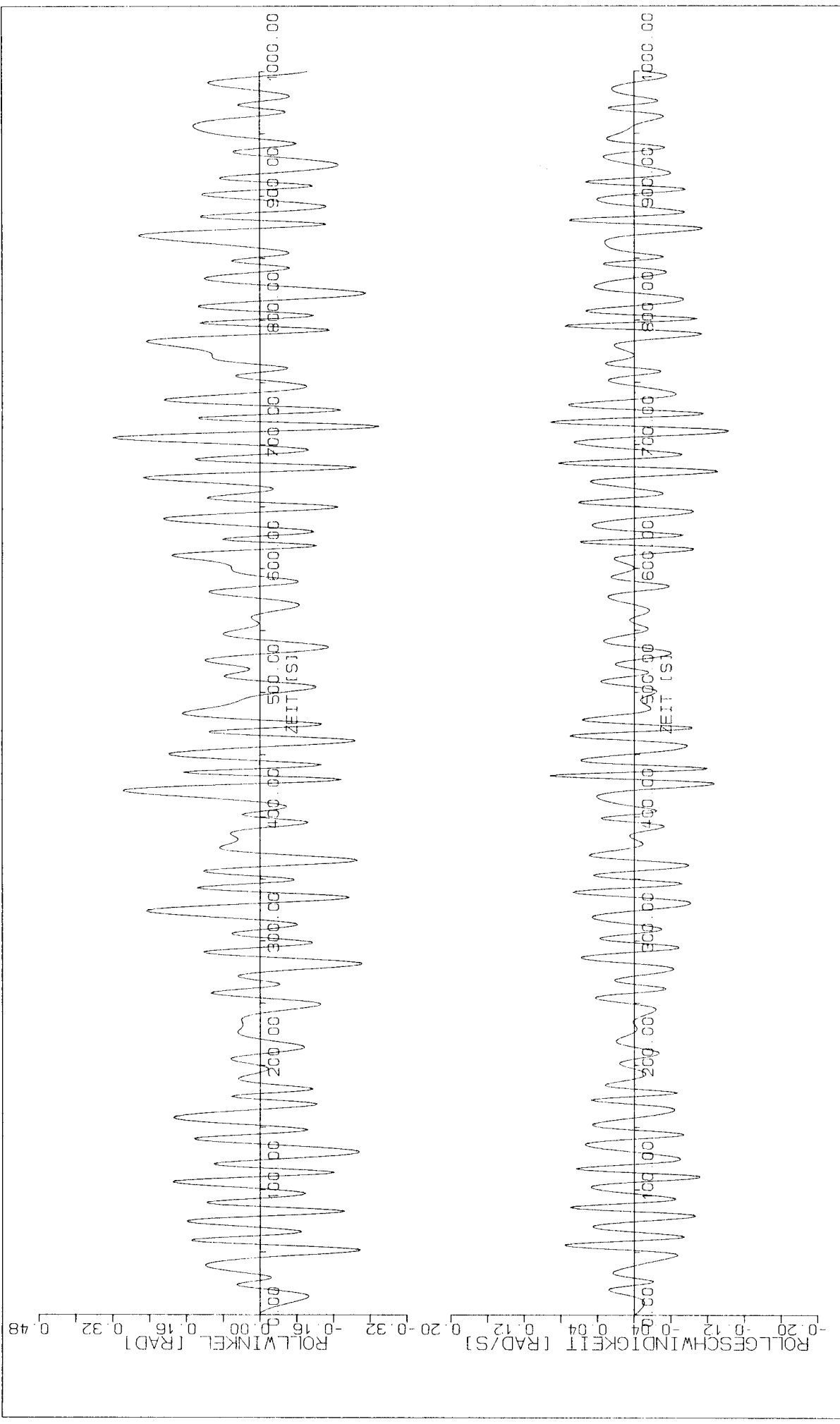
Kennzeichnende Wellenhöhe = 8.5m						
Kennzeichnende Periode = 12.642s						
Längsbewegungen berücksichtigt?	Haupt- begegnungs- winkel [°]	$\overline{GM}$ [m]	Geschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]			
			0.00	5.14	7.72	10.26
ja	0	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	13	-	1	1
		0.18	16	6	-	-
nein	0	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	17	-	-	-
		0.18	16	3	-	-
ja	45	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	1	-	-	-
		0.18	10	7	-	-
nein	45	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	3
		0.18	-	6	-	-
ja	90	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
nein	90	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
ja	135	0.78	-	-	-	2
		0.58	-	2	2	2
		0.38	3	3	1	4
		0.18	-	-	-	-
nein	135	0.78	-	-	-	1
		0.58	-	1	1	5
		0.38	5	3	4	2
		0.18	4	-	1	-
ja	180	0.78	-	5	6	7
		0.58	5	10	7	9
		0.38	17	14	10	8
		0.18	12	5	1	2
nein	180	0.78	-	10	6	7
		0.58	2	11	10	6
		0.38	19	14	14	7
		0.18	17	9	6	4

Kennzeichnende Wellenhöhe = 6.0m Kennzeichnende Periode = 9.040s						
Längsbewegungen berücksichtigt?	Haupt- begegnungs- winkel [°]	$\overline{GM}$ [m]	Geschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]			
			0.00	5.14	7.72	10.26
ja	0	0.78	4	-	-	-
		0.58	12	-	2	-
		0.38	7	-	3	3
		0.18	-	56	2	-
nein	0	0.78	2	-	-	-
		0.58	10	-	1	-
		0.38	9	-	4	9
		0.18	1	61	1	-
ja	45	0.78	-	-	-	-
		0.58	9	-	1	8
		0.38	9	29	3	25
		0.18	6	56	42	-
nein	45	0.78	1	-	-	-
		0.58	4	-	1	14
		0.38	4	31	1	23
		0.18	-	54	44	-
ja	90	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
nein	90	0.78	-	-	-	-
		0.58	-	-	-	-
		0.38	-	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
ja	135	0.78	3	-	-	-
		0.58	3	-	-	-
		0.38	2	-	-	-
		0.18	-	-	-	-
nein	135	0.78	7	-	-	-
		0.58	14	-	-	-
		0.38	9	-	-	-
		0.18	1	-	-	-
ja	180	0.78	10	-	-	-
		0.58	18	-	-	-
		0.38	14	-	-	-
		0.18	6	-	-	-
nein	180	0.78	8	-	-	-
		0.58	18	-	-	-
		0.38	13	-	-	-
		0.18	4	-	-	-

## C Plotbilder und Histogramme

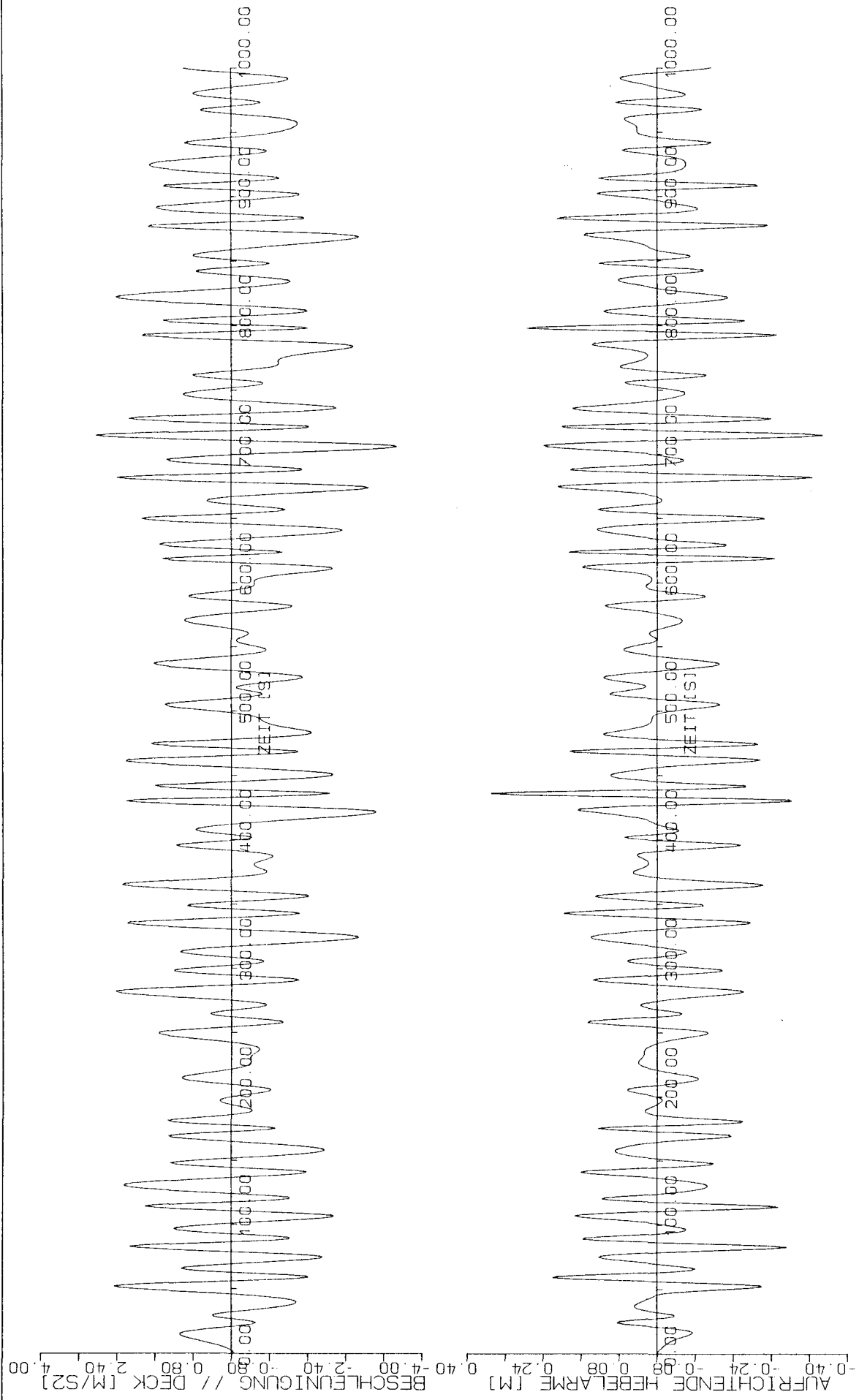
Beispielplots für die kennzeichnende Periode  $T_1 = 9.04 \text{ s}$

Längsbewegungen berücksichtigt	Plots Bild- Nr.	Histogramme Bild- Nr.	$\left[ \frac{\omega_\varphi}{\omega_{\varepsilon 1}} \right]$	$\left[ \frac{\omega_\varphi}{\omega_{\varepsilon 2}} \right]$	$\left[ \frac{\omega_\varphi}{\omega_{\varepsilon 3}} \right]$	$v$ $\left[ \frac{m}{s} \right]$	$\mu$ $[^\circ]$	$WH_{1/3}$ $[m]$
nein	8-12	19	1.744	1.458	1.376	19.95	0	8.5
ja	13-18	20	1.744	1.458	1.376	19.95	0	8.5

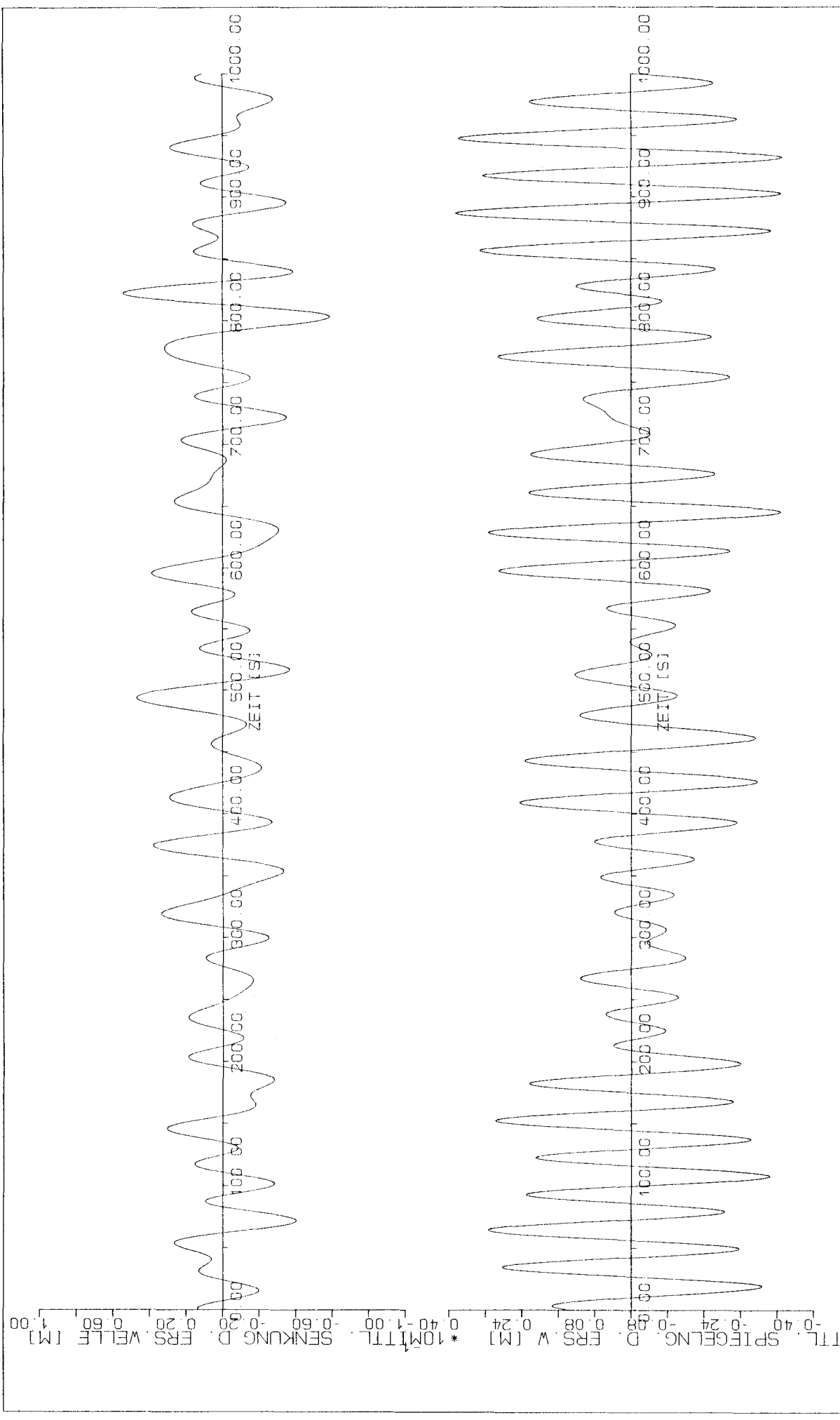


MS "E. L. M. A. TRES"		SEEANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE 127.50 m	SCHIFFSMASSE 14156.00 t	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE 0.78 m	8.50 m
SCHIFFSBREITE 21.00 m	SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT 19.95 kn	MODALE PERIODE 14156.00 t	9.04 s
TIEFGANG 7.59 m		BEUGUNGSWINKEL 19.95 kn	0.00
SIMULATIONSERGEBNISSE			
OHNE BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KROEGER	

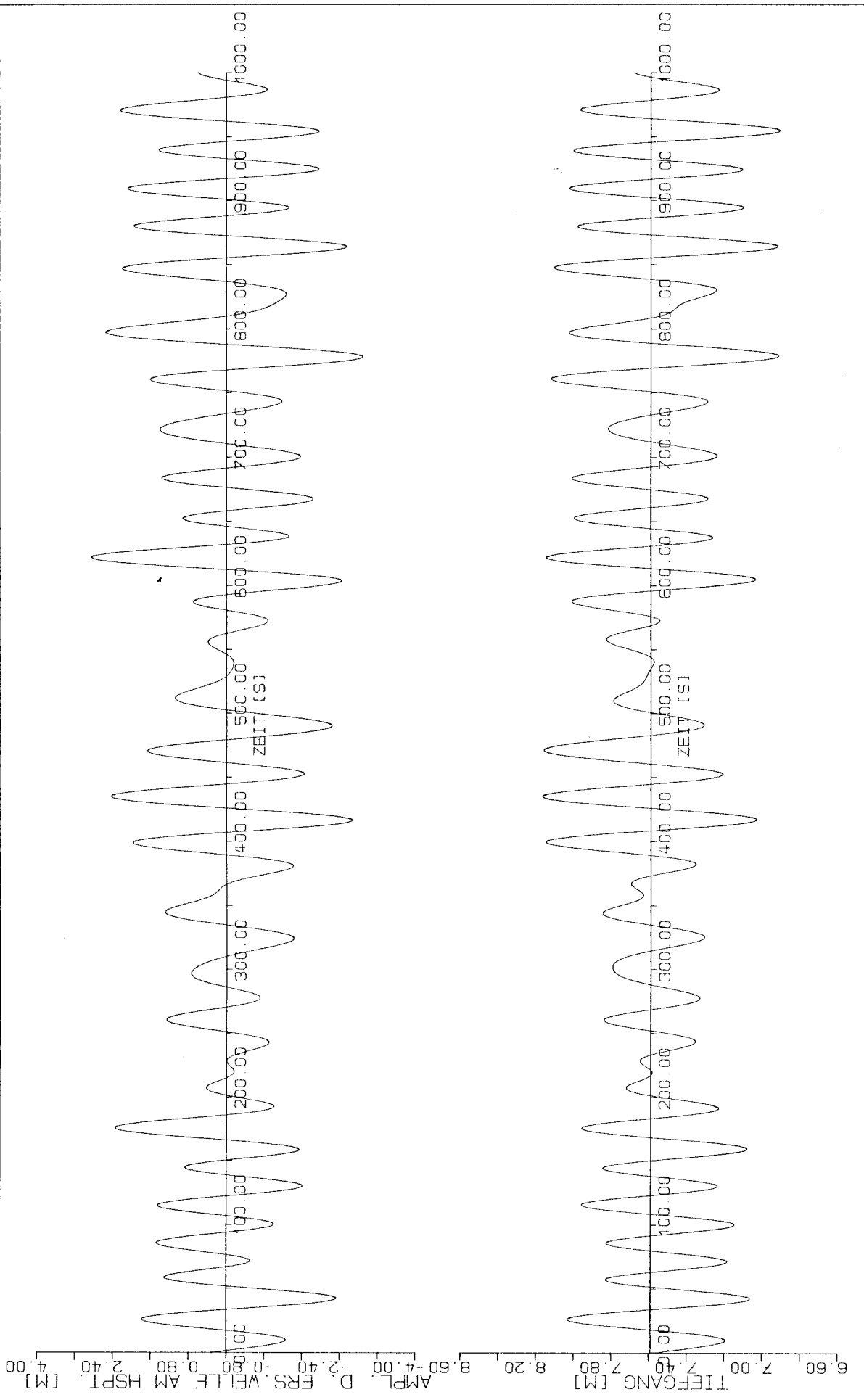
BILD 8



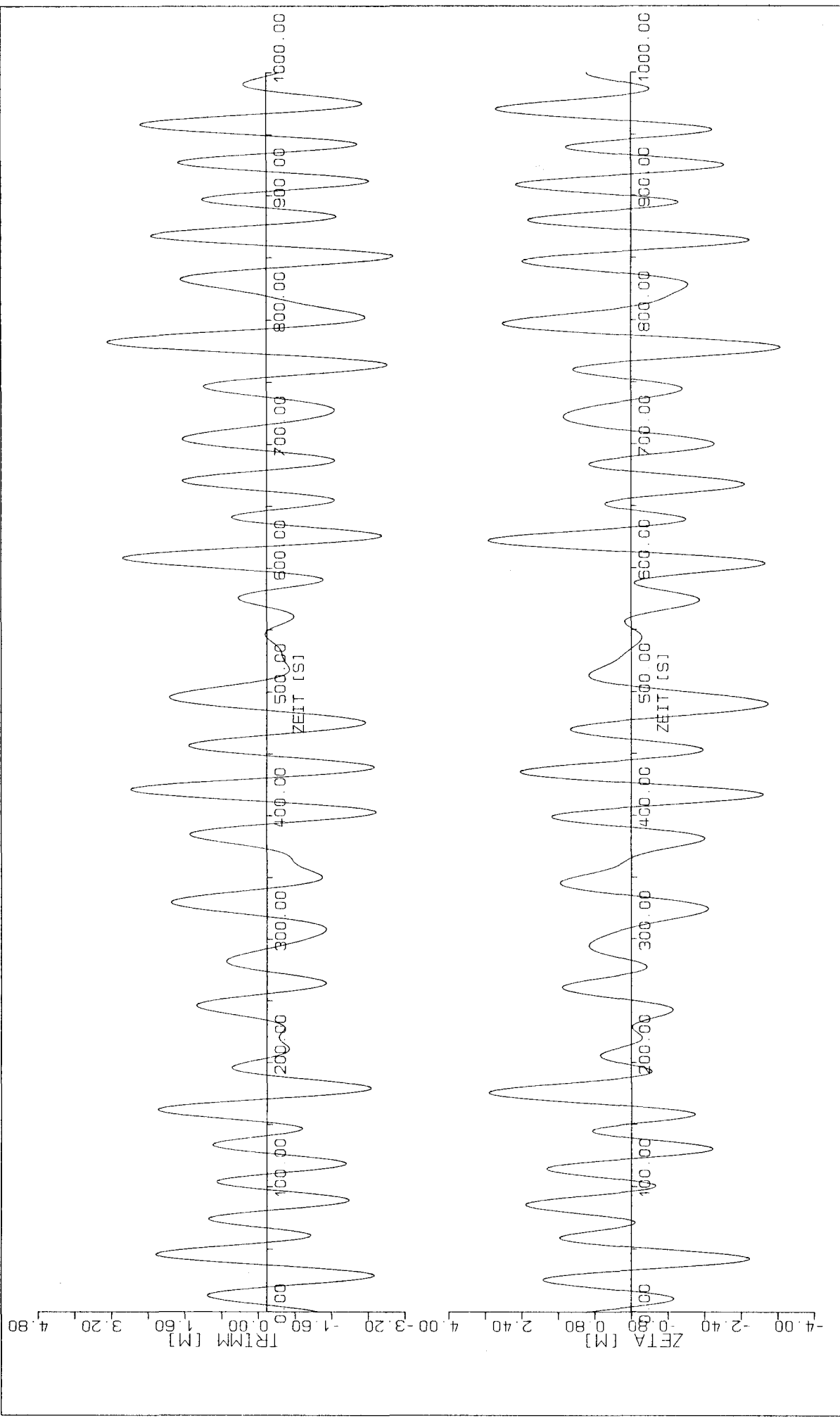
MS "E. L. M. A. TRES"		SEEGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE	127.50 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE	8.50 m
SCHIFFSBREITE	21.00 m	MODALE PERIODE	9.04 s
TIEFGANG	7.59 m	SCHIFFSMASSE	14156.00 t
		SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT	19.95 kn
SIMULATIONSERGEBNISSE			
OHNE BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KROEGER	



MS "E. L. M. A. PRES"		SEEGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE	127.50 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE	8.50 m
SCHIFFSBREITE	21.00 m	MODALE PERIODE	9.04 s
TIEFGANG	7.59 m	BEGEGNUNGSWINKEL	0.00
SIMULATIONSERGEBNISSE			
OHNE BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86 KROEGER			

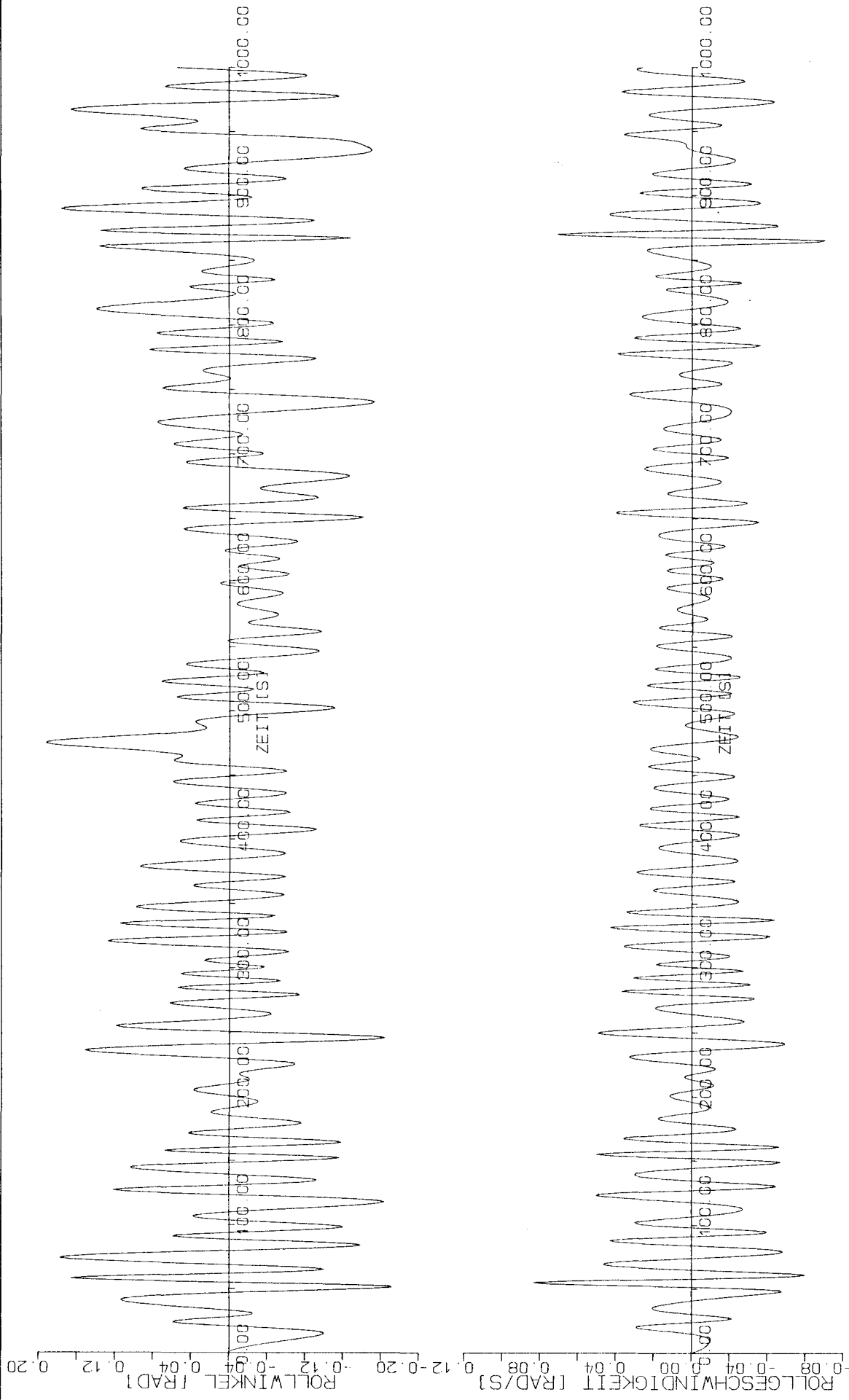


MS "E.L.M.A. TRES"		SEEANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE 127.50 m	GM 0.78 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE	8.50 m
SCHIFFSBREITE 21.00 m	SCHIFFSMASSE 14156.00 t	MODALE PERIODE	9.04 s
TIEFGANG 7.59 m	SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT 19.95 kn	BEGEGNUNGSWINKEL	0.00
SIMULATIONSERGEBNISSE			
OHNE BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KROEGER	

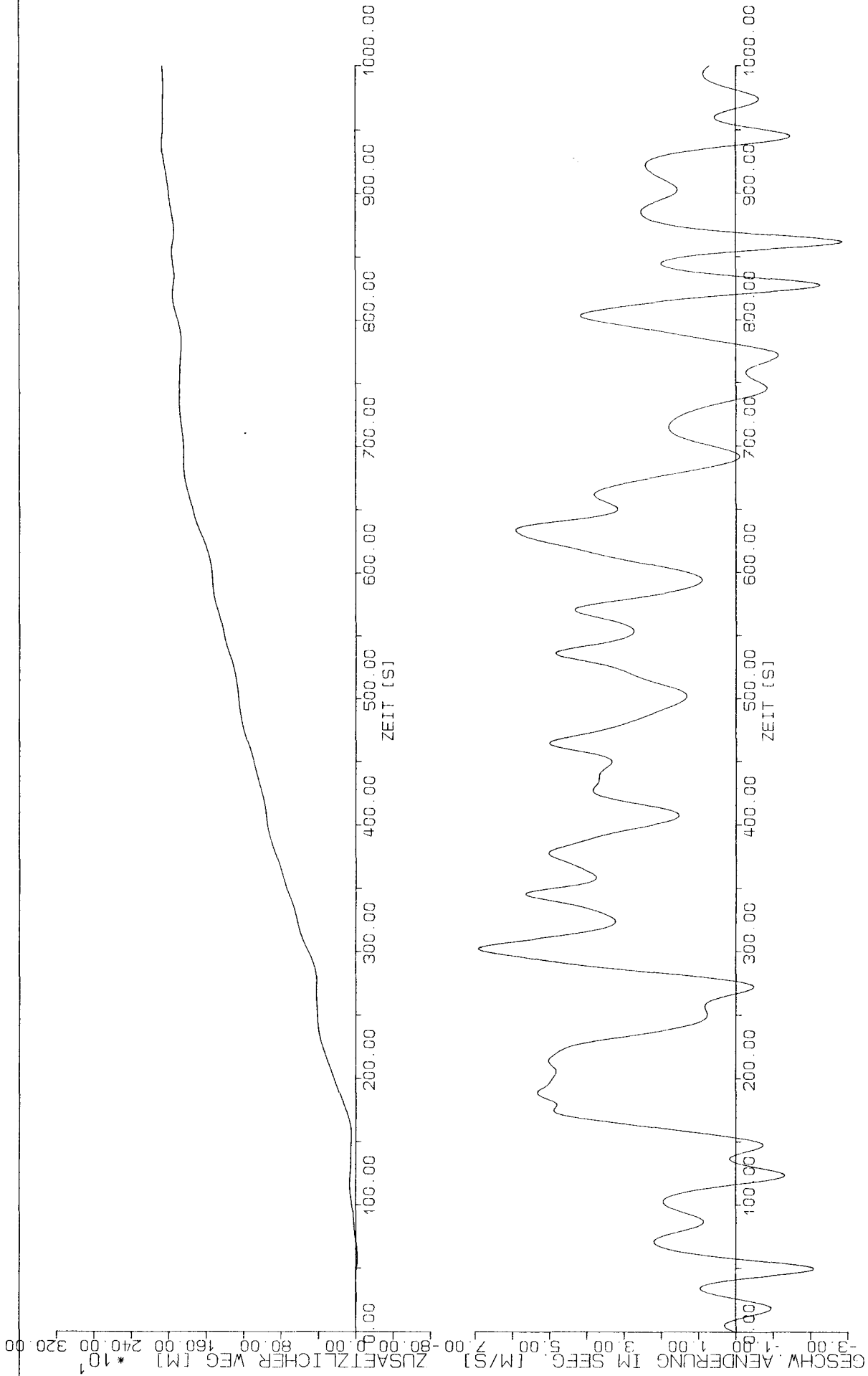


MS "E. L. M. A. TRES"		SEEGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE	127.50 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE	8.50 m
SCHIFFSBREITE	21.00 m	MODALE PERIODE	9.04 s
TIEFGANG	7.59 m	BEWEGUNGSWINKEL	0.00
SIMULATIONSERGEBNISSE			
OHNE BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KROEGER	

BILD 12

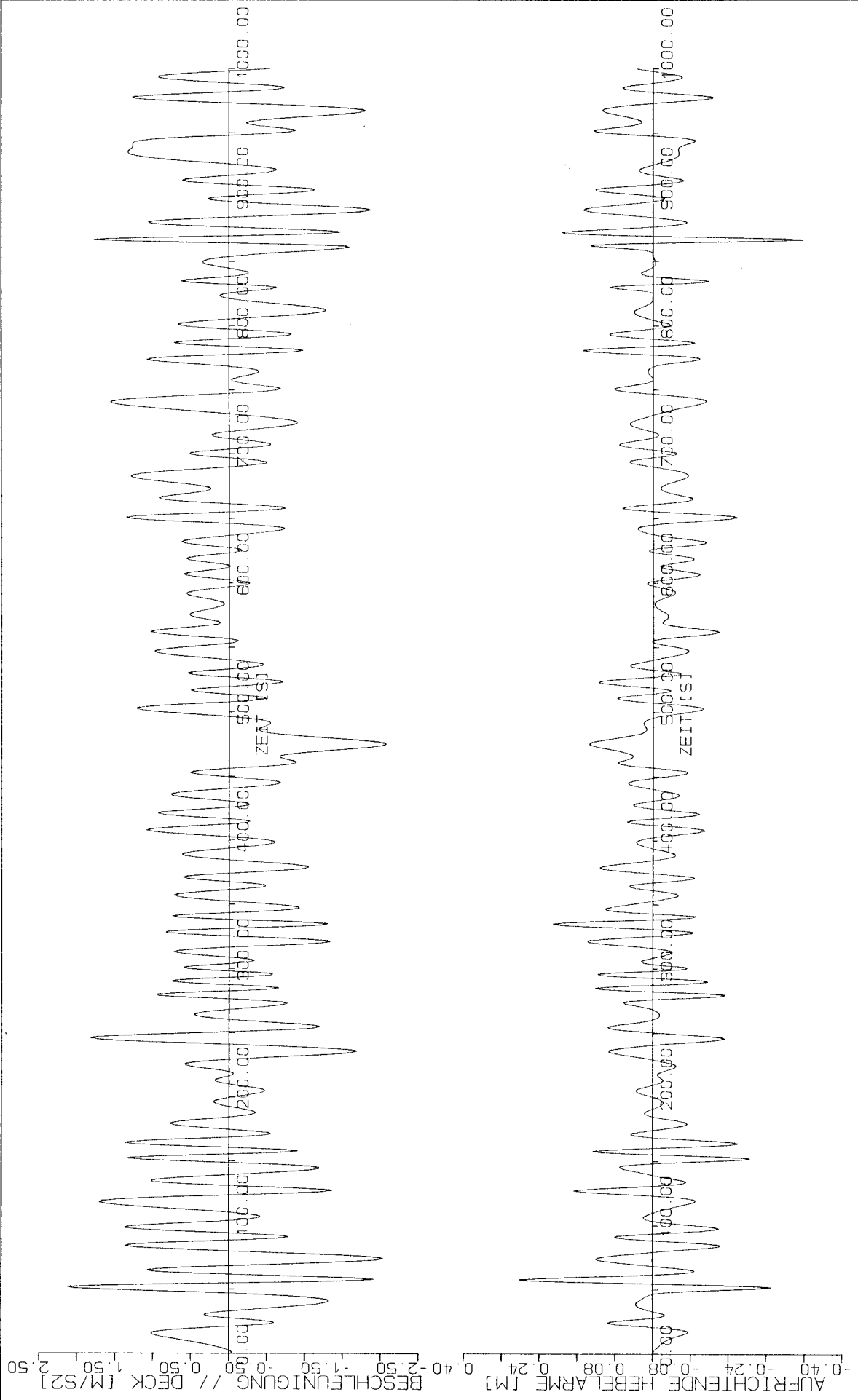


MS "E.L.M.A. TRES"		SEEGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE 127.50 m	GM 0.78 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE 8.50 m	
SCHIFFSBREITE 21.00 m	SCHIFFSMASSE 14156.00 t	MODALE PERIODE 9.04 s	
TIEFGANG 7.59 m	SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT 19.95 kn	BEGEGNUNGSWINKEL 0.00	
SIMULATIONSERGEBNISSE			
UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KROEGER	

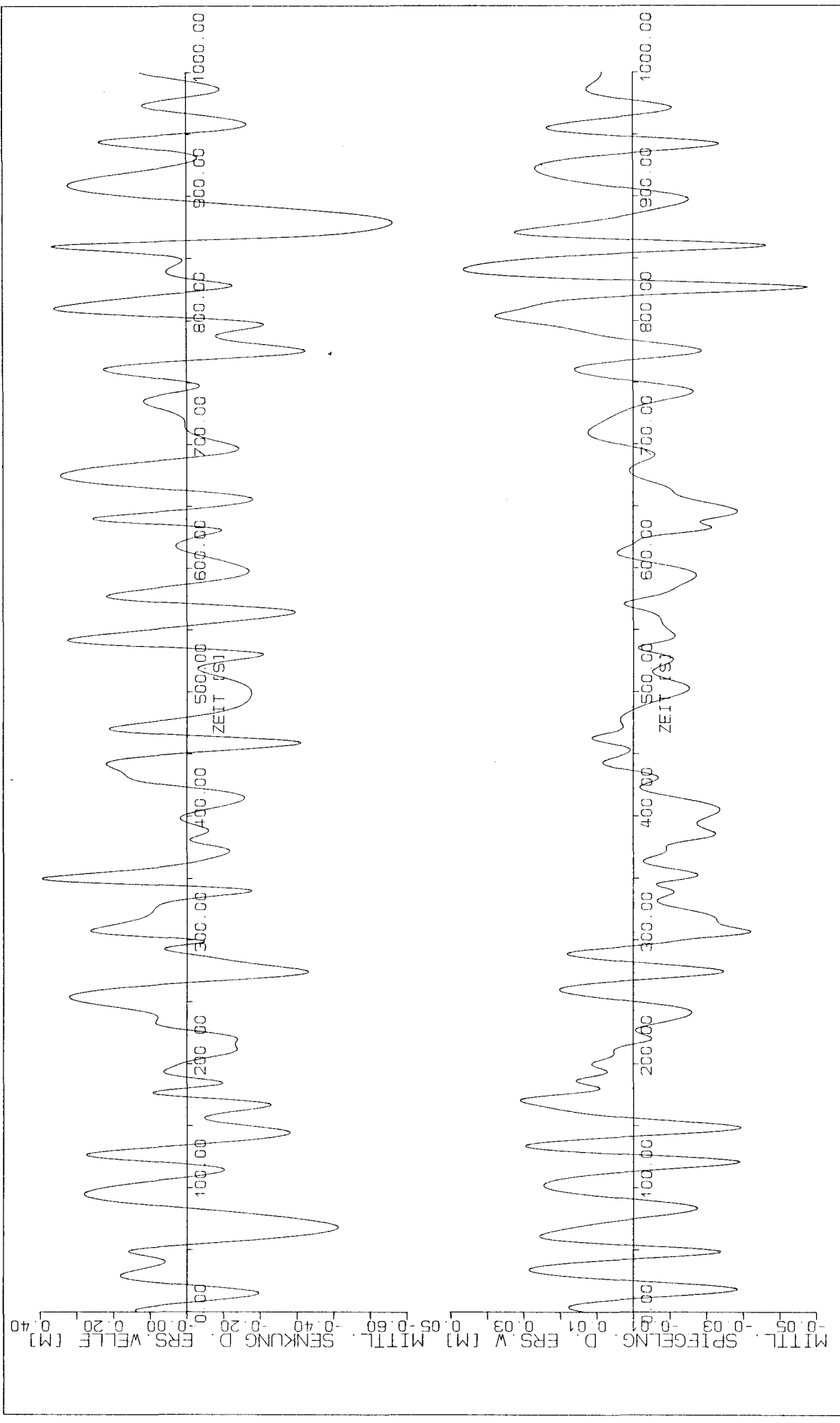


MS "E.L.M.A. TRES"		SEEGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE	127.50 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE	8.50 m
SCHIFFSBREITE	21.00 m	MODALE PERIODE	9.04 s
TIEFGANG	7.59 m	BEGEGNUNGSWINKEL	0.00
SCHIFFSMASSE		0.78 m	
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT		14156.00 t	
		19.95 kn	
SIMULATIONSERGEBNISSE			
UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KROEGER	

BILD 14

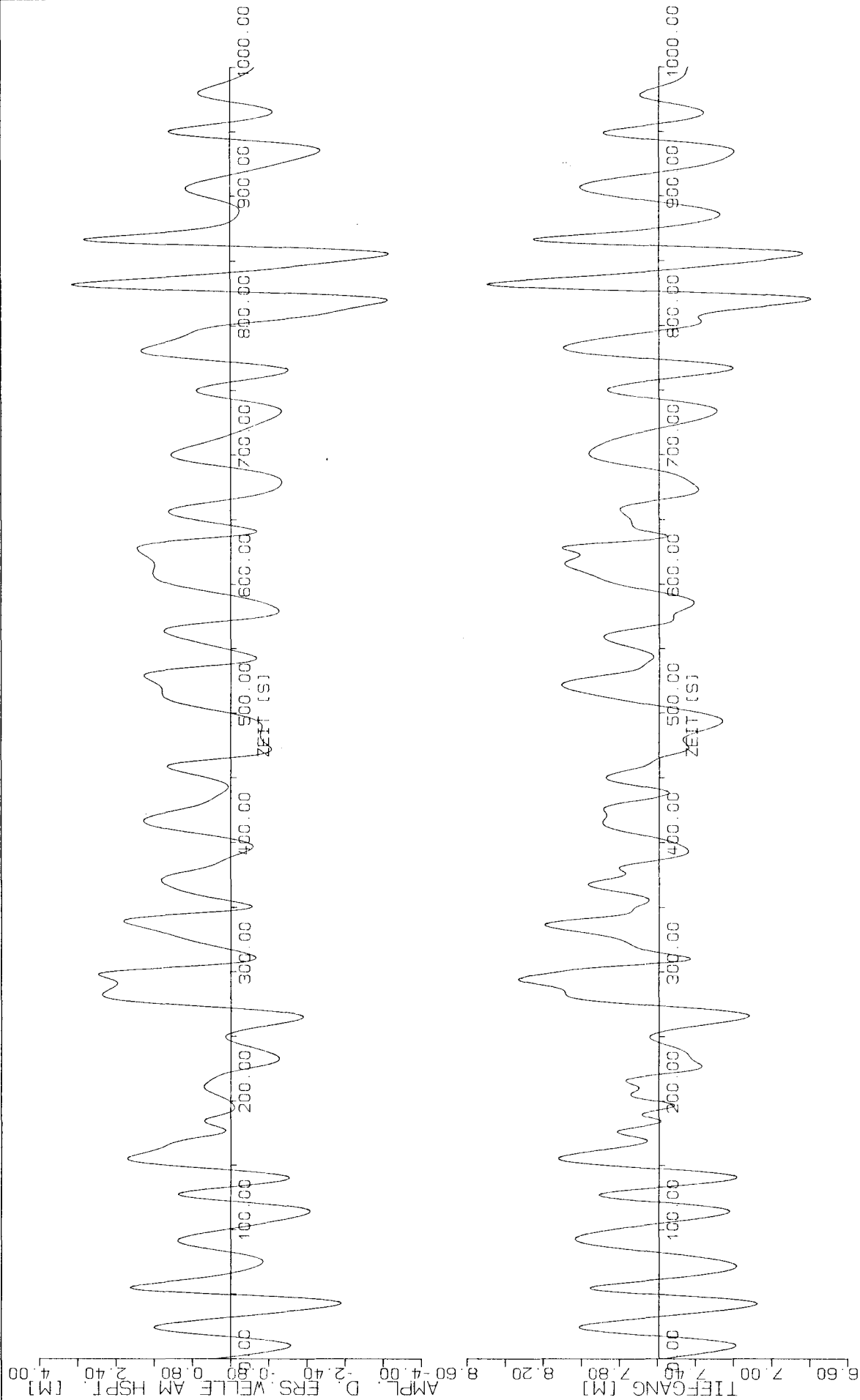


MS "E.L.M.A. TRES"		SEEGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE	127.50 m	KENNZEICHENDE WELLENHOEHE	8.50 m
SCHIFFSREITE	21.00 m	MODALE PERIODE	9.04 s
TIEFGANG	7.59 m	BEGEGNUNGSWINKEL	0.00
SIMULATIONSERGEBNISSE			
UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KROEGER	

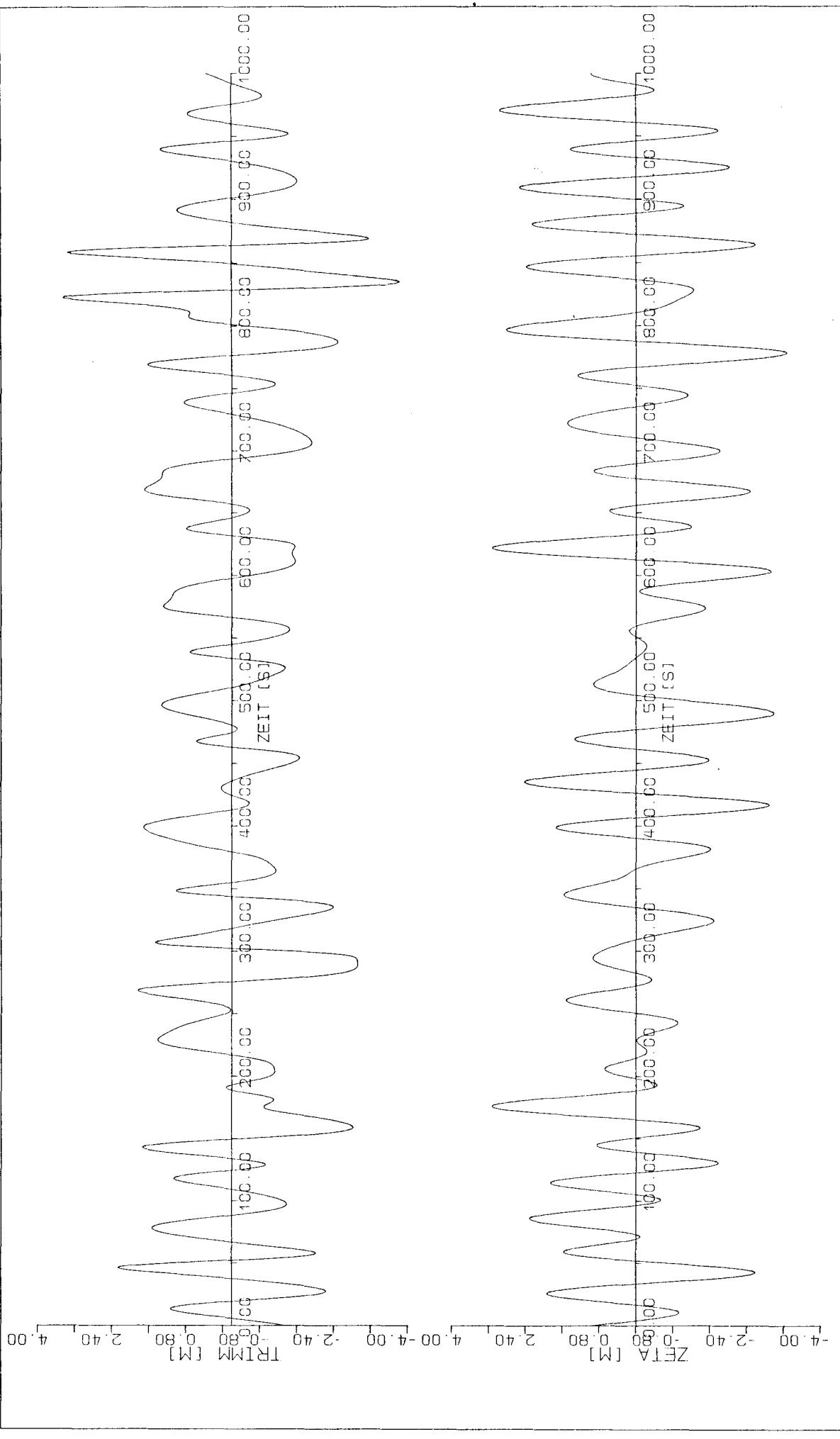


MS "E. L. M. A. TRES"		SEEGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE	127.50 m	KENNZEICHENDE WELLENHOEHE	8.50 m
SCHIFFSBREITE	21.00 m	MODALE PERIODE	9.04 s
TIEFGANG	7.59 m	BEWEGUNGSWINKEL	0.00
SIMULATIONSERGEBNISSE			
UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KROEGER	

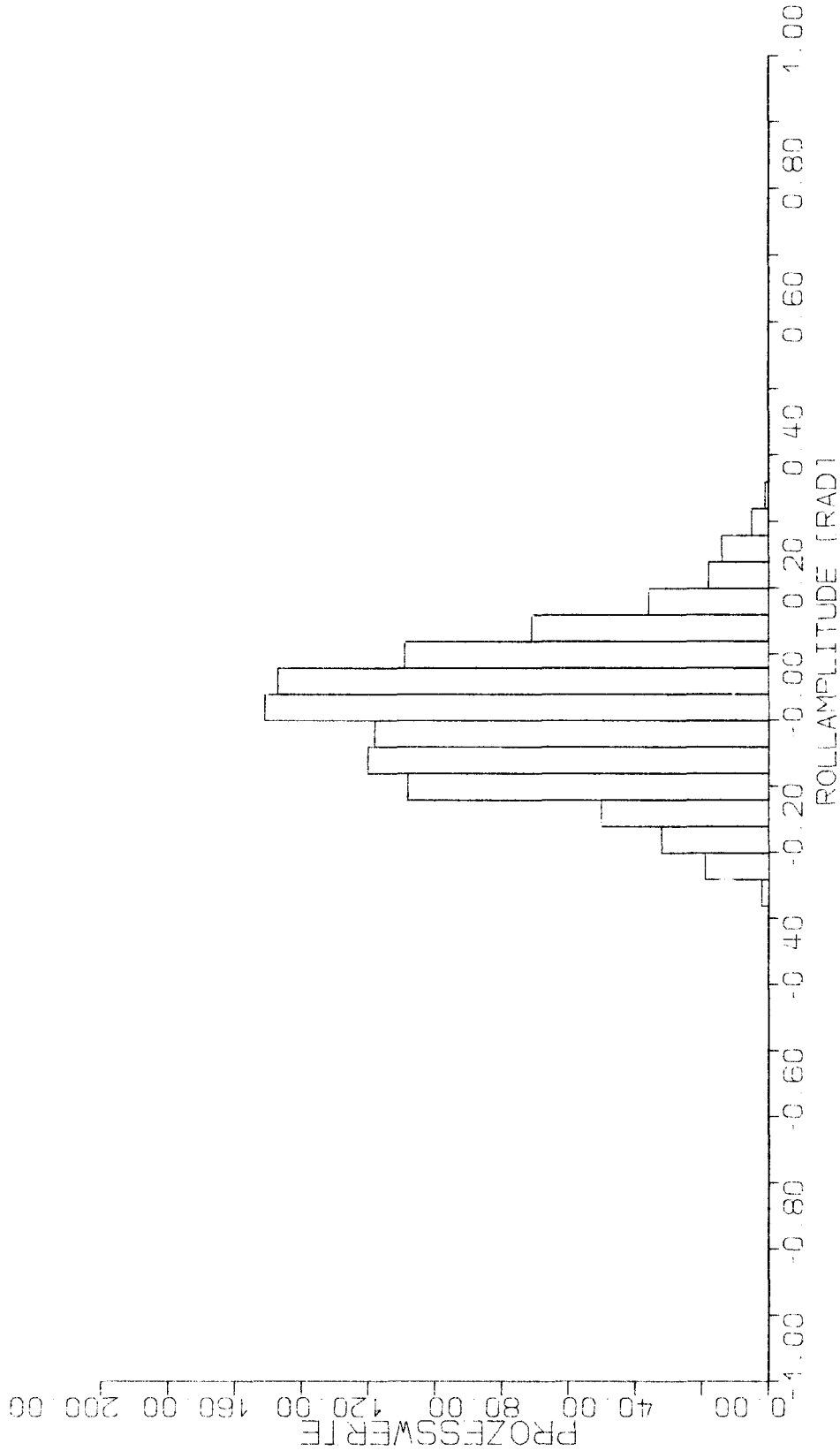
BILD 16



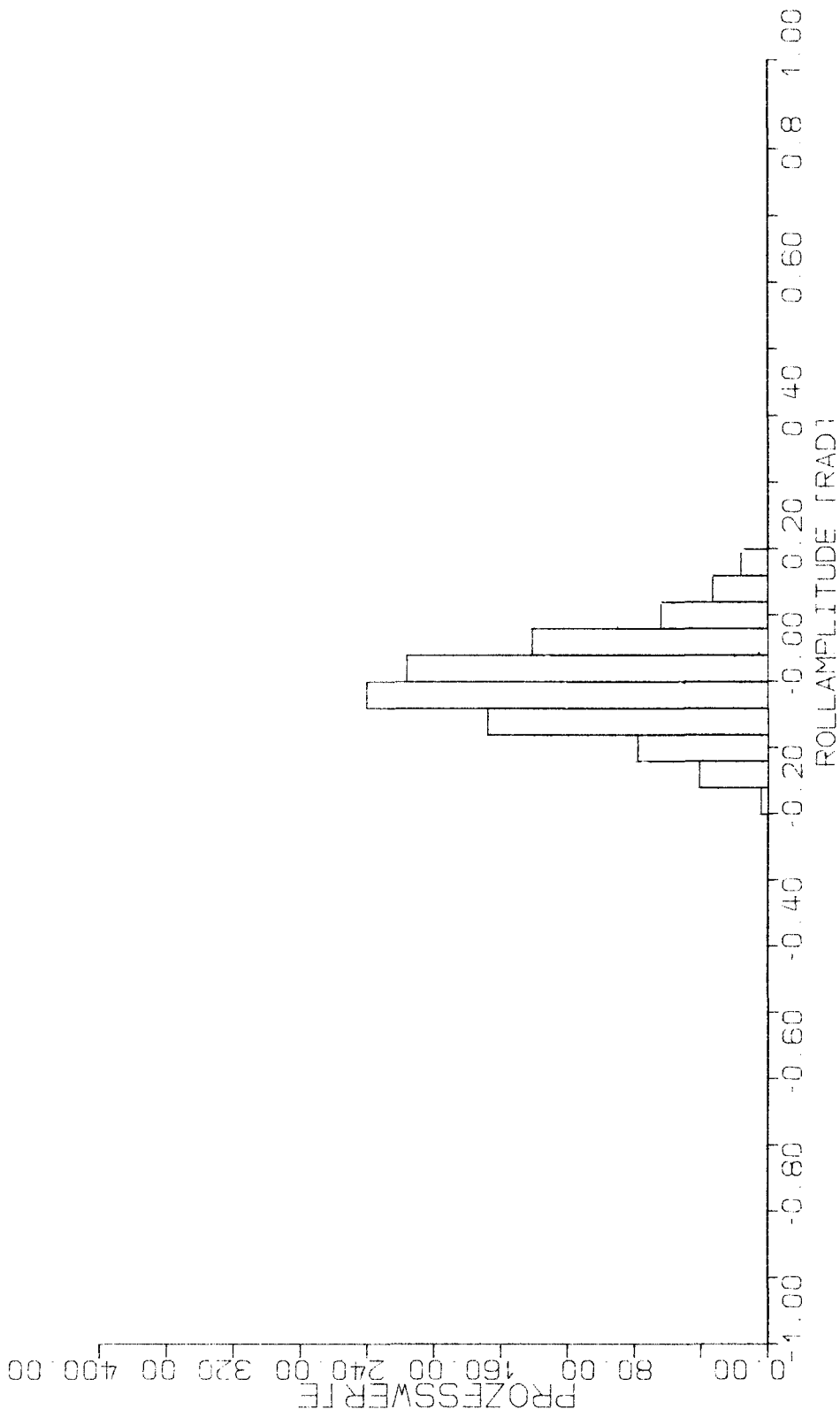
MS "E.L.M.A. PRES"		SEEGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE	127.50 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE	8.50 m
SCHIFFSBREITE	21.00 m	MODALE PERIODE	9.04 s
TIEFGANG	7.59 m	SCHIFFSMASSE	14156.00 t
		SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT	19.95 kn
SIMULATIONSERGEBNISSE		BEGEGNUNGSWINKEL	0.00°
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86 KROEGER			
UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			



MS "E. L. M. A. FRES"		SEEGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE 127.50 m	GM 0.78 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE 14156.00t	8.50 m
SCHIFFSBREITE 21.00 m	SCHIFFSMASS 19.95 kn	MODALE PERIODE 19.95 kn	9.04 s
TIEFGANG 7.59 m	SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT 19.95 kn	BEGEGNUNGSWINKEL 0.00	0.00
SIMULATIONSERGEBNISSE			
UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86 KROEGER			



MS 'E L M A 'RES'		SEFGANGSDATEN	
SCHIFFSLAENGE	127.50 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE	8.50 m
SCHIFFSBREITE	24.00 m	MODALE PERIODE	9.04 s
TIEFGANG	7.59 m	BEUGUNGSWINKEL	0.00°
SIMULATIONSERGEBNISSE			
OHNE BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KRUEGER	



MS 'E. L. M. A. 'FRES'		SEFGANGSDAT	
SCHIFFS-LAENGE 127.50 m	GM 0.78 m	KENNZEICHNENDE WELLENHOEI 14156 GGT	8.50 m
SCHIFFS-BREITE 21.00 m	SCHIFFS-MASSSE 14156 GGT	MODALP. PERIODE 19.95 kn	9.04 s
TIEFGANG 7.59 m	SCHIFFS-SCHWINDIGKEIT	BEUGENUNGSWINKEL	0.00°
SIMULATIONSERGEBNISSE			
UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER LAENGSBEWEGUNG			
IFS - HAMBURG			
7-SEP-86		KPGEOER	