

472 | Januar 1987

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Hock-Seng Koh

Einfluß eines Schlinderdämpfungstanks auf die Rollbewegungen eines Schiffes

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Einfluss eines Schlingerdämpfungstanks auf die Rollbewegungen eines Schiffes

Hock-Seng Koh, 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. 472

Einfluß eines Schlingerdämpfungstanks auf die
Rollbewegungen eines Schiffes

von

H.-S. Koh

Januar 1987

Inhalt

1	Aufgabenstellung	2
2	Simulation der Rollbewegungen eines Schiffes	3
2.1	im Seegang (ohne Schlingerdämpfungstank)	3
2.1.1	Bewegungsgleichung des Schiffes	3
2.1.2	Simulationsmethode	4
2.2	mit U-förmigem Schlingerdämpfungstank	6
2.2.1	Einleitung	6
2.2.2	Bewegungsgleichung des Schiffes und des Tankwassers	6
2.3	mit quaderförmigem Schlingerdämpfungstank	9
2.3.1	Theoretische Grundlagen	9
2.3.2	Flüssigkeitsbewegung in einem Tank	10
	Bewegungsgleichungen	10
	Berechnungsmethode	11
2.3.3	Bewegungsgleichung des Schiffes	12
3	Simulationsergebnisse	13
3.1	im Seegang	13
3.2	mit U-förmigem Schlingerdämpfungstank	14
3.3	mit quaderförmigem Schlingerdämpfungstank	15
4	Schlußbemerkung	16
5	Literaturverzeichnis	16

1 Aufgabenstellung

Es ist eine Tatsache, daß die Rollbewegung eines Schiffes ein unerwünschtes Merkmal darstellt. Um die Rollbewegungen beeinflussen zu können, sind Schlingerdämpfungsanlagen notwendig.

In dieser Arbeit /1/ wurde versucht, in ein Simulationsprogramm die Wirkung eines Schlingerdämpfungstank mit einzubauen und für ein RoRo-Schiff Simulationen der Rollbewegungen ohne und mit Schlingerdämpfungstank durchzuführen. Diese Simulationsmethode ermöglicht dadurch die Aussagen über das Rollverhalten eines Schiffes im Seegang.

Dabei wurden zunächst ungesteuerte U-förmige Tanks untersucht. Anschließend wurden auch andere quaderförmige Tanks mit freier Oberfläche über die gesamte Tankbreite, untersucht. Der Zweck solcher Untersuchungen ist es, den Einfluß der Wasserbewegungen im Tank auf das Rollverhalten eines Schiffes zu bestimmen und zu analysieren. Ein wichtiger Teil der Arbeit umfaßt auch das Studium der Flüssigkeitsbewegung im Tank.

Bei der Untersuchung wurden die wesentlichsten Parameter, z.B. die Tankabmessungen, Lage des Tanks, Dämpfung des Tankwassers, die metazentrische Höhe des Schiffes und die Parameter des natürlichen Seegangs, in dem das Schiff fährt, variiert. Als anschauliches Maß für die Rollbewegung dient die kennzeichnende Rollamplitude (Mittelwert der 1/3 größten Rollamplituden), eventuell auch die maximale Rollamplitude.

2 Simulation der Rollbewegungen eines Schiffes

2.1 im Seegang (ohne Schlingerdämpfungstank)

2.1.1 Bewegungsgleichung des Schiffes

Für die Rollbewegung des Schiffes wird das Verfahren von Kröger /2/ zugrundegelegt. Dabei wird die Rollbewegung nach der folgenden nichtlinearen Bewegungsgleichung simuliert:

$$\overbrace{\Theta_{xs}\ddot{\varphi}}^{\text{Trägheitsmoment}} + \overbrace{d_L\dot{\varphi} + d_Q\dot{\varphi}|\dot{\varphi}|}^{\text{Dämpfungsmoment}} + \overbrace{(g - \ddot{z})m_s h(\varphi, t, T) + \Theta_{xz}\ddot{\vartheta}\sin\varphi}^{\text{Rückstellmoment}} = \overbrace{\Theta_{xs}\ddot{\varphi}_L + D_L\dot{\varphi}_L + gm_s\overline{GM}\varphi_L}^{\text{Erregungsmoment } M} \quad (1)$$

Darin sind

φ	Rollwinkel des Schiffes (+ nach Steuerbord)
$\dot{\varphi}$	Rollgeschwindigkeit
$\ddot{\varphi}$	Rollbeschleunigung
Θ_{xs}	Massenträgheitsmoment des Schiffes um die Rollachse
d_L	Lineare Rolldämpfungskonstante
d_Q	Quadratische Rolldämpfungskonstante
g	Erdbeschleunigung
\ddot{z}	Vertikalbeschleunigung des Schiffes am Hauptspant (+ nach unten), berechnet nach der Streifenmethode
$\ddot{\vartheta}$	Stampfwinkelbeschleunigung (+ Bug nach oben), berechnet nach der Streifenmethode
m_s	Schiffsmasse
h	aufrechtender Hebelarm, abhängig von φ , Trimm t und Tiefgang T des Schiffes
Θ_{xz}	Massendeviationsmoment des Schiffes
M	Moment um die Rollachse infolge der Wellen und infolge der Quer- und Gierbewegung des Schiffes, berechnet nach der Streifenmethode
φ_L	(unrealistischer) Rollwinkel

D_L angesetzte Dämpfungskonstante, ergibt sich aus der Streifenmethode

\overline{GM} metazentrische Höhe, korrigiert um allen freien Oberflächen

φ_L wird aus der Wellenerhebung am Hauptspant und der nach der Streifenmethode berechneten Übertragungsfunktion für Rollen bestimmt.

Die linearen(d_L) und die quadratischen(d_Q) Rolldämpfungskonstanten werden nach Blume /3/ bestimmt.

Definitionen für das Simulationsprogramm:

Tauchen: + nach unten, gemessen am Hauptspant

Stampfen: + bei Bug nach oben

Querbewegung: + nach Steuerbord, gemessen in Höhe der WL

Gieren: + bei Bug nach Steuerbord

Rollen: + bei Krängung nach Steuerbord

Begegnungswinkel: 0 bei See von hinten

$\frac{\pi}{2}$ bei See von Steuerbord

2.1.2 Simulationsmethode

Das Simulationsprogramm beschäftigt sich vor allem mit der parametrischen Roll-
erregung durch Schwankungen der Hebelarmkurve zwischen Wellenberg- und Wellentallage
des Schiffes. Dabei werden lineare Kopplungen mit der Quer- und Gierbewegung und
nichtlineare Kopplungen mit der Tauch- und Stampfbewegung vereinfacht erfaßt; die
Längsbewegung wird völlig vernachlässigt. Tauchbewegung und Stampfbewegung wer-
den während der Simulation mit Hilfe der Übertragungsfunktionen bestimmt.

Das Verfahren kann für Seegang aus beliebiger Richtung eingesetzt werden. Dazu wird
der stochastische Seegang durch die Überlagerung von regelmäßigen Einzelwellen mit ver-
schiedenen Frequenzen, Laufrichtungen und mit zufälligen und gleichverteilten Phasen-
winkeln angenähert. Für die Beschreibung des Seegangs wird ein schmales Spektrum, das
Wallops-spektrum, in Abhängigkeit von der modalen Kreisfrequenz ω_m und der kennzeich-
nenden Wellenhöhe $H_{1/3}$ benutzt:

$$S_{\zeta}(\omega) = \alpha g^2 \omega_m^{n-5} \omega^{-n} \exp\left[-\frac{n}{4} \left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^4\right]$$

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

$$n = \frac{-2}{\ln 2} \ln\left(\frac{p}{\sqrt{2}}\right)$$

$$\alpha \approx 0.885p + 2.280p^{1.5} - 3.101p^2$$

Die Auswahl der Einzelwellen erfolgt nach Vorgabe einer Laufrichtung und einer vorherr-
schenden Frequenz. Die Real- und Imaginärteile der komplexen Amplitude einer Einzel-
welle n errechnen sich zu

$$\zeta_{nRe} = \sqrt{\frac{2S(\omega_n, \mu_n) \Delta\omega_n \Delta\mu_n \cos \epsilon}{4}}$$

$$\zeta_{n, t_n} = -\sqrt{2S(\omega_n, \mu_n)\Delta\omega_n\Delta\mu_n \sin \epsilon}$$

In diesen Beziehungen ist $\Delta\omega_n$ das Frequenzintervall, $\Delta\mu_n$ das Laufrichtungsintervall und ϵ die Phasenverschiebung.

Da die Hebelarme nicht als Summe der Hebelarmänderungen von regelmäßigen Einzelwellen berechenbar sind, wird die Wasserspiegelhöhe durch eine Ersatzwelle angenähert /2/.

Ein Verfahren wird benutzt, um den Verlauf der aufrichtenden Hebel über dem Krängungswinkel und die Schwankung der Hebel infolge des Seegangs und der Schiffsbewegungen zu bestimmen. Die Hebelarme selbst werden für die Wellenberg-, Glattwasser- und Wellentallage abhängig vom Tiefgang, Trimm und Krängungswinkel für die Wellenlänge, die gleich der Schiffslänge ist, mit dem Programmsystem Archimedes berechnet und abgespeichert. Bei jedem Simulationszeitschritt wird der aufrichtende Hebel h für den aktuellen Krängungswinkel φ , Trimm t und Tiefgang T quadratisch zwischen den Werten für Wellenberg-, Glattwasser- und Wellentallage interpoliert.

Das auf den Schiffskörper wirkende äußere Moment M wird auf Grund der Streifenmethode berechnet. Das gesamte erregende Moment durch den Seegang wird durch die Überlagerung der Momente der regelmäßigen Einzelwellen, aus denen der Seegang erzeugt wird, bestimmt.

Mit Hilfe der berechneten Übertragungsfunktionen wird das Rollverhalten des Schiffes in unregelmäßigem, kurzkämmigen Seegang simuliert. Die Zeitintegration der Differentialgleichung, ausgehend von Anfangsbedingungen, erfolgt nach dem Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung mit vom Benutzer vorgegebener konstanter Schrittweite.

Diese Simulationsmethode ist für große Rollamplituden des Schiffes geeignet.

2.2 mit U-förmigem Schlingerdämpfungstank

2.2.1 Einleitung

Der zweite Teil der Arbeit befaßt sich mit der Simulation der Rollbewegung eines Schiffes mit eingebautem U-förmigem Tank im Seegang. Er besteht aus zwei an Backbord und Steuerbord gelegenen Seitentanks, welche durch einen Querkanal verbunden sind. Das Tanksystem muß auf die jeweilige Rollperiode des Schiffes abgestimmt werden. Die Eigenperiode des Tanks T_{TK} hängt hauptsächlich von der Länge und dem Querschnitt des Kanals sowie von der Größe der Wasseroberfläche in den Seitentanks ab:

$$T_{TK} = 2\pi\sqrt{\frac{l'}{g}} \quad \text{wobei} \quad l' = \int_0^L \frac{A}{a} dl$$

Hierin sind

- A Querschnitt des Seitentanks
- a Querschnitt des Verbindungskanals
- l' reduzierte Länge des U-Tanks
- L Koordinaten entlang der mittleren Linie in U-förmigem Tank
- g Erdbeschleunigung

Die optimale Wirkung solcher Anlagen wird in regelmäßigem Seegang bei Resonanz erreicht, d.h., wenn die Frequenz der angreifenden Welle mit der Eigenfrequenz des Schiffes zusammenfällt, wobei auch immer die größten Rollwinkel auftreten.

In der Vergangenheit häufig angewandte Vorhersageverfahren, die von Resonanzbedingungen und regelmäßigen Wellen ausgehen, sind praktisch unrealistisch. Für die Vorhersage der Rollwinkelreduzierung eines Schiffes durch einen U-förmigen Tank wurde die Simulationmethode so ergänzt, daß der Einfluß der Wasserbewegungen im Tank berücksichtigt wird. Die Tankwasserbewegungen werden dazu aus den Rollbewegungen unter Vernachlässigung der Querbewegungen, aber mit Berücksichtigung der Tauch- und Stampfbewegungen berechnet.

Dabei werden folgende Annahmen zugrundegelegt:

- Die Tanks sind im Mittschiffsbereich angeordnet
- Die Tanks sind symmetrisch zur Mittschiffsebene angeordnet
- Die Schenkel der Tanks(im Bereich der Flüssigkeitsspiegelausschläge) sind gerade, parallel und von konstantem Querschnitt

2.2.2 Bewegungsgleichung des Schiffes und des Tankwassers

Zur Aufstellung der Bewegungsgleichungen kann man entweder das Prinzip von LAGRANGE, das d'Alembertsche Prinzip oder einfach das Newtonsche Prinzip benutzen.

In Anlehnung an die Veröffentlichung von J. H. Chadwick und K. Klotter /4/ werden die Bewegungsgleichungen des Schiffes mit U-förmigem Schlingerdämpfungstank weiterentwickelt. Hier handelt es sich um das Problem der erzwungenen Bewegungen von Schiff und Schlingerdämpfungstank.

Rollbewegung des Schiffes:

$$\Theta_x \ddot{\varphi} + d_L \dot{\varphi} + d_Q \varphi |\dot{\varphi}| + (g - \ddot{z})mh(\varphi, t, T) + \Theta_{xz} \ddot{\psi} \sin \varphi + \Theta_{st} \ddot{\psi} + d_{st} \dot{\psi} + 2\rho(g - \ddot{z})AR^2 \psi = M \quad (2)$$

Bewegung des Tankwassers:

$$\Theta_t \ddot{\psi} + d_t \dot{\psi} |\dot{\psi}| + 2\rho(g - \ddot{z})AR^2 \psi + \Theta_{st} \ddot{\varphi} + 2\rho(g - \ddot{z})AR^2 \varphi = 0 \quad (3)$$

Hierin sind (siehe auch Bild 1)

- ψ Neigungswinkel des Tankwasserspiegels in den Kanalschenkeln gegen die Schiffslinie
- Θ_x Massenträgheitsmoment des Schiffes Θ_{xs} + Massenträgheitsmoment des Tankwassers Θ_{xt} bezogen auf die Rollachse
- m Masse des Schiffskörpers + Masse des Tankwassers (Es ist darin die Masse des Tankwassers wie die eines fest gefrorenen Gewichtes enthalten gedacht.)
- Θ_t Massenträgheitsmoment des Tanks um Schwerpunktschwerachse des Tanks
- d_t Koeffizient der quadratischen Tankdämpfung

Die Trägheitsmomente in den Gleichungen (2) und (3) sind durch die Eigenschaften des U-förmigen Schlingerdämpfungstanks wie folgt beschrieben:

$$\Theta_{xt} = \rho l_t \int_0^L ar^2 dl$$

$$\Theta_{st} = \rho AR^2 \int_0^L \frac{d}{R} dl$$

$$\Theta_t = \rho AR^2 \int_0^L \frac{A}{a} dl$$

Als Überschlag wird angesetzt:

$$\Theta_{xt} = \rho l_t \left[(2R - w_T) w_R \left\{ \frac{(2R - w_T)^2 + w_R^2}{12} + h_R^2 \right\} + 2w_T \left(h_T + \frac{w_R}{2} \right) \left\{ \frac{w_T^2 + (h_T + \frac{w_R}{2})^2}{12} + R^2 + \left(h_R - \frac{h_T}{2} + \frac{w_R}{4} \right)^2 \right\} \right]$$

$$\Theta_{st} = 2\rho AR^2 (h_t + h_R)$$

$$\Theta_t = 2\rho g AR^2 \left(\frac{T_t}{2\pi} \right)^2$$

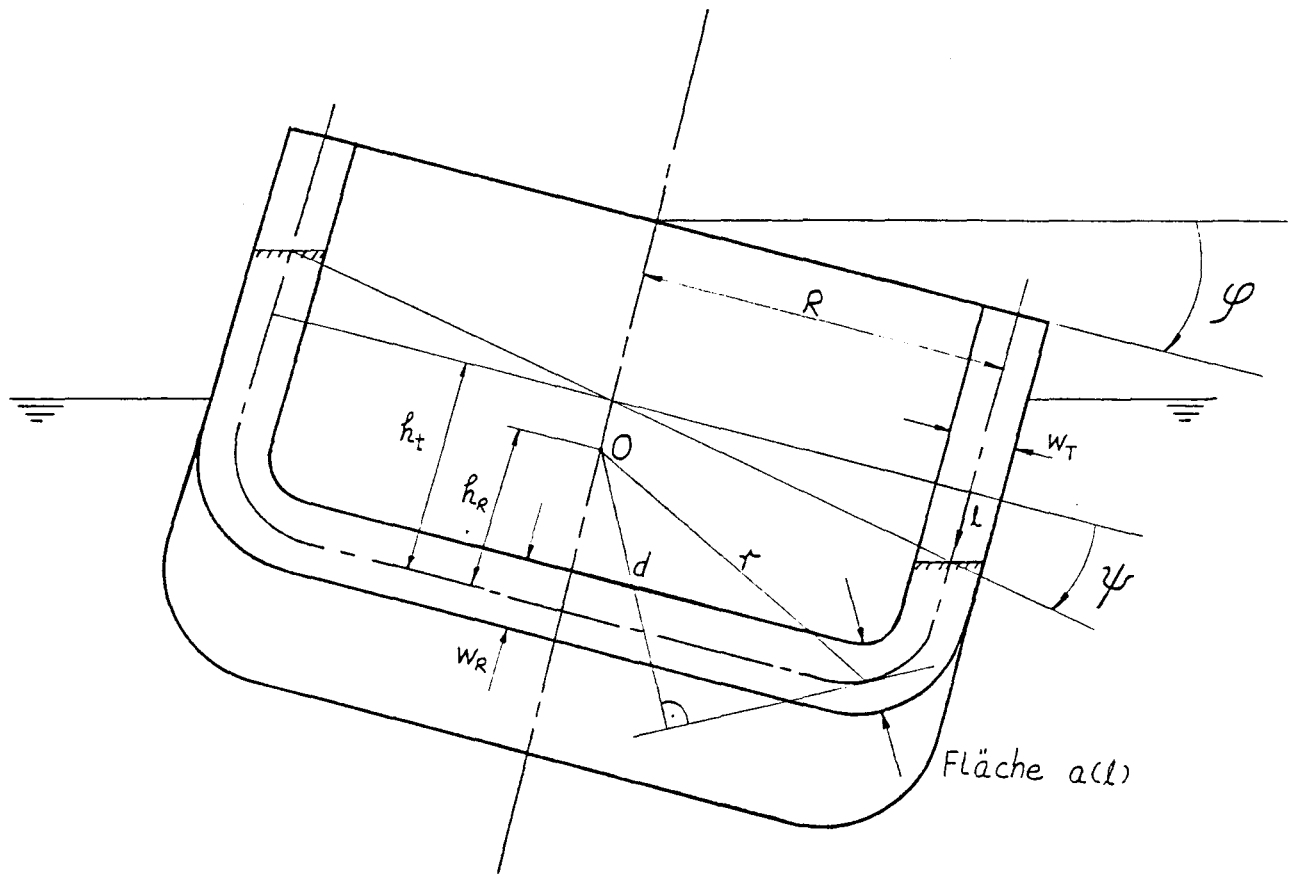


BILD 1. DAS SCHIFF - TANK SYSTEM

Hierin sind

ρ	Dichte des Tankwassers
l_t	Tanklänge
r	Abstand des Punktes auf der mittleren Linie in U-förmigen Tank von Punkt O
R	Abstand der Tankschenkel von der Mittschiffslinie
d	Senkrechter Abstand von Punkt O zu einem Punkt auf der mittleren Linie in U-förmigem Tank
h_t	Höhe der Flüssigkeit in den Schenkeln
h_R	Senkrechter Abstand von Punkt O zur mittleren Höhe in Verbindungskanal (h_R ist negativ, wenn der Tank oberhalb des Punktes O liegt.)
w_R	Höhe des Verbindungskanals
w_T	Breite des Tankschenkels

Das 6. bis 8. Glied in Gleichung (2) stellen die Wirkung des Tankwassers auf das Schiff dar. Für die weitere Rechnung wird $d_{st} = 0$ gesetzt, da der Einfluß der Reibung zu vernachlässigen ist.

Das 5. Glied in Gleichung (3) stellt die hydrostatische Wirkung des Tankwassers infolge Schiffsbewegung, Glied 4 die Trägheitsrückwirkung dar. Reibungsrückwirkung kommt nicht in Frage, da die Tankwasserreibung unabhängig von $\dot{\varphi}$ ist, weil $\dot{\psi}$ relativ zum Schiff gemessen ist.

Θ_t hängt nur von der Form des Tanks ab, aber nicht von dessen Lage im Schiff. Θ_{st} hängt nicht nur von der Größe des Tanks ab, sondern auch von seiner Lage hinsichtlich des Punktes O. Wird der Tank nach oben verschoben, so nimmt Θ_{st} ab. Der Koeffizient kann verschwinden oder sogar negativ werden.

Die Tankhöhe ist eine wichtige Größe bei der Dimensionierung des Tanks. Bei schwerer See mit großen Rollwinkeln kann es leicht passieren, daß das Tankwasser die Tankdecke erreicht. Um festzustellen, ob dieser Sättigungseffekt bei den gewählten Seegängen überhaupt auftritt, werden nicht nur die Rollamplituden ermittelt, sondern auch die dabei auftretenden Tankwasserbewegungen. Der Rollwinkel des Schiffes und der Neigungswinkel des Tankwassers ergeben sich aus der Zeitintegration.

2.3 mit quaderförmigem Schlingerdämpfungstank

2.3.1 Theoretische Grundlagen

Das Ziel dieser Untersuchung ist, die Kräfte zu berechnen, die die bewegte Flüssigkeit innerhalb eines quaderförmigen Tanks auf das Schiff ausübt und anschließend die Rollbewegung zu betrachten.

Man muß zwei gekoppelte Gleichungen lösen, da die Wasserbewegung von der Rollbewegung des Schiffes abhängt, die wiederum von den Kräften, die auf das Schiff ausgeübt werden, abhängt.

Die längste Eigenperiode eines quaderförmigen Tanks bei Anregung durch die Rollbewegungen eines Schiffes ist dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenlänge der Flachwasserwellen die diese Eigenperiode haben, gleich der doppelten Tankbreite ist. Es folgt die längste Eigenperiode des Tanks für die Querbewegungen des Wassers zu:

$$T_{TK} = \sqrt{\frac{4\pi b}{g \tanh\left(\frac{\pi h}{b}\right)}} \\ \approx \frac{2b}{\sqrt{gh}} \quad h < 0.2b$$

wobei h = Flüssigkeitshöhe
 g = Erdbeschleunigung
 b = Tankbreite

Die Eigenperiode des Schiffes lautet:

$$T_{Schiff} = \frac{2\pi i_B}{\sqrt{g\overline{GM}}}$$

wobei i_B = $0.38B$
 B = Schiffsbreite
 \overline{GM} = korrigierte metazentrische Höhe

Dadurch kann man die optimale Wasserhöhe des quaderförmigen Tanks bestimmen:

$$T_{TK} = T_{Schiff} \\ \Rightarrow h = \frac{b}{\pi} \tanh^{-1}\left(\frac{b\overline{GM}}{\pi(0.38B)^2}\right) \\ = \left(\frac{b}{0.38\pi B}\right)^2 \overline{GM} \quad \text{Überschlag!} \\ = 0.7072\overline{GM} \quad \text{wobei } b = B$$

2.3.2 Flüssigkeitsbewegung in einem Tank

Bewegungsgleichungen

In den meisten Fällen werden die sogenannten Flachwassergleichungen herangezogen. Es handelt sich dabei um die Strömung mit freier Oberfläche einer idealen Flüssigkeit, bei der die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen praktisch nur in einer Richtung (parallel zum Tankboden) erfolgt, so daß die zum Tankboden senkrechte Geschwindigkeitskomponente vernachlässigt und somit die Flüssigkeitgeschwindigkeit unabhängig von der Höhenkoordinate (z-Achse) angesetzt werden kann.

Bild 2 zeigt das verwendete Koordinatensystem und Bild 3 die Parameter des Tanks.

Es wird vorausgesetzt, daß die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen praktisch nur in der yz-Ebene erfolgt. Da die z-Komponente der Geschwindigkeit vernachlässigt wird, hat man es nur mit einer eindimensionalen Strömung zu tun.

Die Flachwassergleichungen im schiffsfesten Koordinatensystem (x,y,z) für diesen Fall lauten (siehe /5/, /6/):

Impulssatz in y-Richtung:

$$\frac{\delta v}{\delta t} + v \frac{\delta v}{\delta y} + a_z \frac{\delta h}{\delta y} = f_y \quad (4)$$

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\delta h}{\delta t} + v \frac{\delta h}{\delta y} + h \frac{\delta v}{\delta y} = 0 \quad (5)$$

wobei

$$a_z = \ddot{\zeta} \cos \varphi - \ddot{\eta} \sin \varphi + g \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 s + \ddot{\varphi} y + 2\dot{\varphi} v \quad (6)$$

$$f_y = -\ddot{\zeta} \sin \varphi - \ddot{\eta} \cos \varphi - g \sin \varphi + \ddot{\varphi} s + \dot{\varphi}^2 y \quad (7)$$

$v(y)$ = Geschwindigkeit in y-Richtung (+ nach Backbord) relativ zur Bewegung des Schiffes

$h(y)$ = Höhe der Flüssigkeitsoberfläche, gemessen in z-Richtung (+ nach oben)

s = Abstand zum Rollzentrum

$\ddot{\zeta}$ = Tauchbeschleunigung des Schiffes (+ nach oben)

$\ddot{\eta}$ = Querbeschleunigung des Schiffes (+ nach Backbord)

φ = Rollamplitude des Schiffes

Die Beschleunigungen a_z , f_y sind von v , h , den Schiffsbewegungen $\ddot{\zeta}$, $\ddot{\eta}$, φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ und der Position des Tanks im Schiff s abhängig und werden daher für jeden Zeitschritt neu berechnet /5/. Gesucht sind die zwei Funktionen $v(y,t)$ und $h(y,t)$. Gleichungen

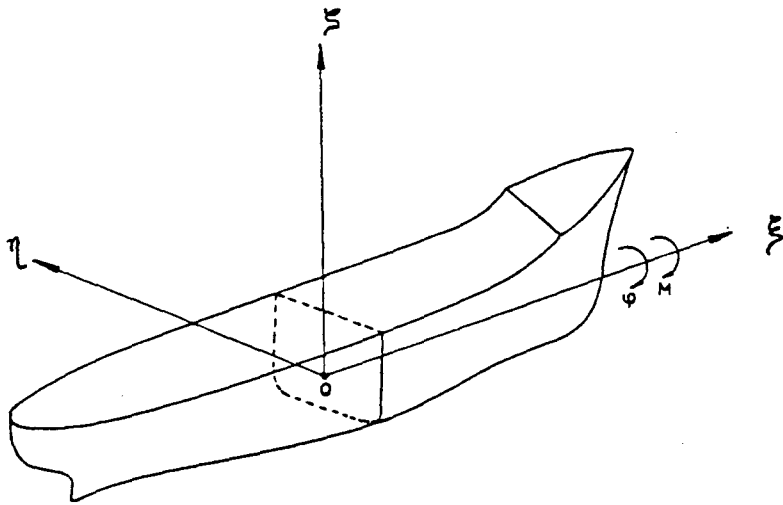


BILD 2. Das Koordinatensystem

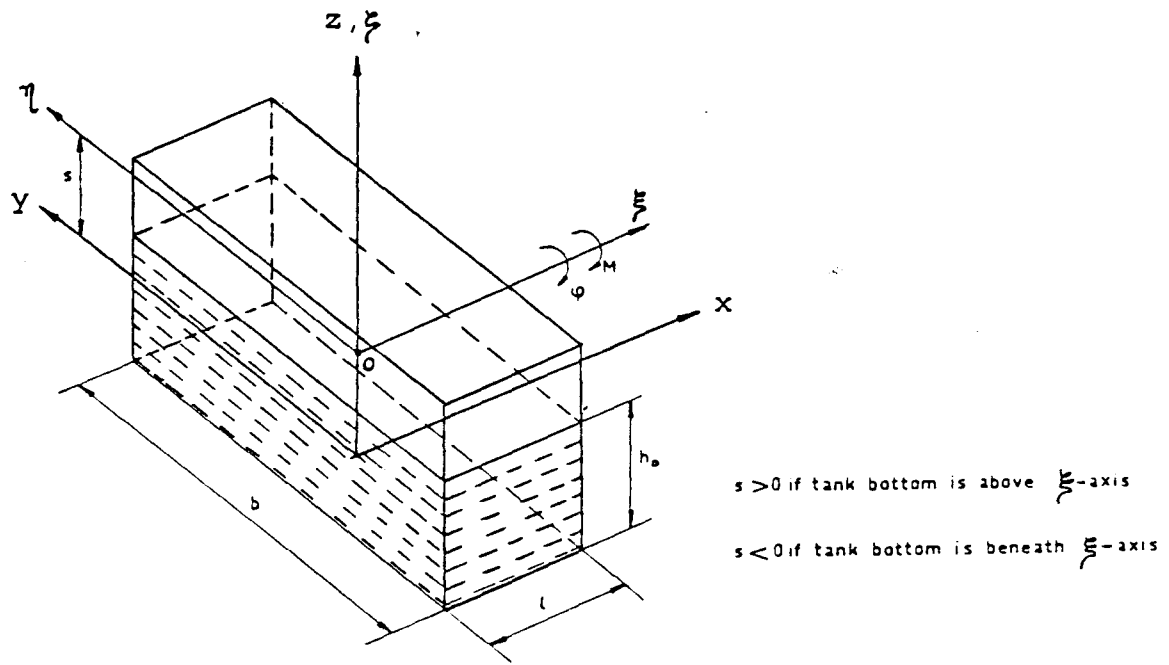


BILD 3. Parameter des Tanks

(4) und (5) sind hyperbolische Gleichungen. Eine numerische Näherungslösung für diese Gleichungen ist die Glimm-Methode (random-choice-method).

Mit dieser Methode kann man die Geschwindigkeit $v(y, t)$ und Wasserhöhe $h(y, t)$ über der Tankbreite berechnen. Die gesamten Kräfte und das Moment, die das bewegte Tankwasser auf das Schiff ausübt, werden wie folgt bestimmt:

y-Kraft pro Länge (auf Backbordseite):

$$\begin{aligned}(F_y)_p &= \int_0^{h_p} p dz \\ &= \int_0^{h_p} \rho (a_z)_p z dz \\ &= \rho (a_z)_p \frac{h_p^2}{2}\end{aligned}$$

wobei p = Druck im Tankwasser

ρ = Dichte des Tankwassers

h_p = Wasserhöhe auf Backbordseite

$(a_z)_p$ = vertikale Beschleunigung auf Backbordseite, nach (6)

y-Kraft pro Länge (auf Steuerbordseite):

$$(F_y)_s = -\rho (a_z)_s \frac{h_s^2}{2}$$

Moment pro Länge um die x-Achse (in der Mitte des Tanks am Tankboden):

$$\begin{aligned}M_\varphi &= - \int_{-B/2}^{B/2} p y dy \\ &\approx - \sum_{i=1}^n \rho (a_z)_i h_i y_i \Delta y\end{aligned}$$

wobei $h_i, (a_z)_i$ abhängig von Lage y_i im Tank und werden auf einem Gitter über die Tankbreite $b = B$ verteilt und mit der Glimm-Methode bestimmt

n = Anzahl der Abschnitte auf dem Gitter

Δy = Breite des Abschnittes

Berechnungsmethode

Von Petey /6/ wurde ein Simulationsprogramm für die Wasserbewegungen durch Anwendung der sogenannten Glimm-Methode erstellt.

Man zerlegt das Problem, indem man für jeden Zeitschritt Δt zuerst annimmt, daß nur a_z , die z-Komponente der Beschleunigung, wirkt ($f_y = 0$, so daß das System homogen wird) und eine Zwischenlösung für h und v findet. Sodann werden die Teilchen in Quer- richtung (y-Richtung) durch f_y zusätzlich beschleunigt, d.h., v entsprechend korrigiert.

Man zerlegt für jeden Zeitschritt Δt die Tankbreite b in Abschnitte der Länge Δy und setzt für jeden Abschnitt i konstante Werte von h und v an. Die Flüssigkeitsoberfläche und das Geschwindigkeitsfeld werden dadurch "stufenförmig" diskretisiert.

An den Grenzen der Abschnitte sind also Unstetigkeiten in h und v vorhanden.

Zu dem Zeitpunkt t werden diese sogenannten Unstetigkeiten plötzlich entfernt. Die Strömungen, die unter der Wirkung der z-Beschleunigung a_z dadurch entstehen, können für $t + \Delta t$ nach analytischen Formeln /5/ bestimmt werden.

Aus dieser analytischen Lösung soll nun eine Näherungslösung zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ konstruiert werden, die — um das Verfahren fortsetzen zu können — wieder abschnittsweise konstante Werte für h und v haben muß.

2.3.3 Bewegungsgleichung des Schiffes

Dadurch kann man die statischen und dynamischen Kräfte, die die bewegte Flüssigkeit auf das Schiff ausübt, berechnen. Diese Kräfte sind dann zu der Erregungskraft M zu addieren, um eine Lösung im Zeitbereich für die Rollbewegung des Schiffes zu erhalten:

$$\Theta_x \ddot{\varphi} + d_L \dot{\varphi} + d_Q \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + (g - \ddot{z}) m_s h(\varphi, t, T) + \Theta_{xz} \ddot{\varphi} \sin \varphi = M + \overbrace{M_\varphi l - F_y l s}^{\text{Tankwassermoment } M_t} \quad (8)$$

Hierin sind Θ_x Massenträgheitsmoment des Schiffes inklusive Tankwasserträgheitsmoment, F_y Kraft in y-Richtung und l Tanklänge.

M_t auf der rechten Seite enthält Kräfte(nichtlineare Funktionen der Schiffsbewegungen), die das bewegte Tankwasser auf das Schiff ausübt.

Die Simulation ist wie folgt durchgeführt. Die Zeit wird in kleine Zeitschritte (z.B. 0.5 s) aufgeteilt. Zu jedem Zeitpunkt wird die Rollbewegung (und auch die andere Schiffsbewegung) berechnet. Die Wasserbewegung wird aus der Schiffsbewegung in diesem Zeitpunkt und der bekannten Wasserbewegung im vorherigen Zeitpunkt mit der Glimm-Methode berechnet. Mit dieser Wasserbewegung werden die Kräfte, die die bewegte Flüssigkeit auf das Schiff ausübt, bestimmt. Diese Kräfte sind mit den Erregungskräften zu kombinieren, um die Schiffsbewegungen für den nächsten Zeitpunkt zu bestimmen, u.s.w.

3 Simulationsergebnisse

Die Auswertung der Simulationen und der jeweils erreichten Rollreduzierung kann auf mehrere Arten erfolgen. Es lassen sich z.B. die RMS-Werte oder die kennzeichnenden Werte der Rollwinkel (Mittelwert der 1/3 größten Rollamplituden) oder die maximal auftretende Rollamplitude während einer Simulationszeit von z.B. 1000 s, in Abhängigkeit von relativem Kurswinkel und der Geschwindigkeit, vergleichen.

Die Ergebnisse solcher Rechnungen für das Schiff ohne Schlingerdämpfungstank (Tabelle 1), mit U-förmigem Tank (Tabelle 2) und quaderförmigem Tank (Tabelle 3), sind jeweils in einer Tabelle zusammengefaßt.

3.1 im Seegang

Für das Beispielschiff bei dem schweren Seegang (kennzeichnende Wellenhöhe $H_{1/3} = 5 \text{ m}$, modale Periode $T_m = 12.4 \text{ s}$) von vorne, seitlich und hinten, und Fahrtgeschwindigkeit von 0 kn und 15 kn , ergibt sich der größte Rollwinkel zu etwa $15^\circ - 18^\circ$ und der kennzeichnende Rollwinkel zu etwa $12^\circ - 14^\circ$, außer bei Fahrt des Schiffes gegen die See mit 15 kn . In diesem Fall, wegen des relativ "breiten" Begeugungsspektrums, ist der Rollwinkel wesentlich kleiner (eine maximale Rollamplitude von ca. 10° und eine kennzeichnende Rollamplitude von 5°).

Bei Fahrt (z.B. 15 kn) sind die Rollwinkel, wegen parametrischer Erregung durch den Seegang, bei achterlicher See größer als bei See seitlich und von vorne, da sich in diesen Frequenzbereichen ein Großteil der Seegangsenergie auf einen engen Frequenzbereich konzentriert und ausgeprägte Resonanz dann möglich ist. Aber große Rollauschläge treten, wegen starker Streuung der Laufrichtung, auch bei seitlichem Seegang auf, da die parametrische Erregung überwiegt.

Die gleichen Erscheinungen treten auch beim leichteren Seegang ($H_{1/3} = 1.88 \text{ m}$, $T_m = 8.8 \text{ s}$) auf, aber die Rollwinkel sind kleiner.

Bei See von vorn ist das Rollen meist weniger stark ausgeprägt, da es sich in diesem Fall um ein breites Begeugungsspektrum handelt.

In dem Fall ($H_{1/3} = 5 \text{ m}$, $T_m = 12.4 \text{ s}$) sind die Rollwinkel bei großem Displacement und bei einer Verringerung der metazentrischen Höhe ($\overline{GM} = 0.86 \text{ m}$) in See aus der Richtung seitlich und von achtern kleiner.

Bild 4, Bild 5 und Bild 6 zeigen mit dieser Simulationsmethode berechnete Zeitfunktionen am Beispiel des RoRo-Schiffes. Die Beschleunigung parallel zum Schiffsdeck ist ein Maß zur Beurteilung der Ladungsbeanspruchung (z.B. Kräfte in den Lashings) im Seegang.

Die Überschreitungshäufigkeitsverteilung der Rollwinkel bei Fahrt des Schiffes zeigt Bild 7. Die Ordinaten stellen die prozentuale Zahl der Rollamplitude dar, welche einen gewissen Wert auf der Abszisse überschritten haben. Die Werte auf der Abszisse sind Rollamplitude während einer Simulationszeit von 1000 s.

3.2 mit U-förmigem Schlingerdämpfungstank

Zur Feststellung des Einflusses der einzelnen Parameter auf das Rollverhalten des eingangs erwähnten Schiffes sind systematische Untersuchungen bei verschiedenen Ladezuständen (verschiedene \overline{GM} und Displacement) und in verschiedenen Seegängen an solchen Tanks durchgeführt worden.

Bild 8, Bild 9 und Bild 10 zeigen die Rollamplituden, Tankwasserneigungen und Beschleunigung parallel zum Deck über der Zeit.

Nach den Ergebnissen von Simulationsrechnungen liegt die Rollreduzierung zwischen 35% und 65%.

Außer den statistischen Kennwerten wie kennzeichnende Rollamplitude, hat es sich eingebürgert, aus den Überschreitungshäufigkeitsverteilungen der Rollamplitude eine Reduktionsziffer zu ermitteln, um Aussage über die Rollreduzierung machen zu können. Da der Flächeninhalt unter der Häufigkeitskurve ein qualitatives Maß der Rollenergie repräsentiert, können die Flächeninhalte der beiden Häufigkeitskurven (ohne und mit Tank) miteinander verglichen und auch als Rollreduzierung ausgedrückt werden.

Bild 11 zeigt die Überschreitungshäufigkeit für den Fall S1212.

- Einfluß des natürlichen Seegangs

Man erkennt, daß bei Fahrt des Schiffes im Seegang von vorne kleine oder sogar negative Rollreduzierung erzielt wird. In diesem Fall wird man die Schlingerdämpfungsanlage nicht einsetzen, sonst ist die Wirkung des Tanks schädlich. Das Schiff erreicht die größte Rollreduzierung (55% – 65%) bei Fahrt in achterlicher See und bei See seitlich.

- Einfluß der Tanklänge/metazentrischen Höhe

Bei dem Displacement $D = 15\,886\ t$ und $\overline{GM} = 1.52\ m$ (S1321) wird bei einer Verringerung der Tanklänge eine Rollreduktion von ca. 50% erreicht. Im Vergleich, bewirkt eine geringere Tanklänge bei dem großen Displacement und bei einer Vergrößerung der metazentrischen Höhe ($\overline{GM} = 0.86\ m$) ca. 60% Rollreduzierung (S1822).

Deshalb werden in der Praxis 2 Tanks (z.B. Tank A = 3 m und B = 6 m), bei Schiffen mit stark schwankenden Ladefällen vorgesehen. In Ladefällen mit kleinem Produkt $D * \overline{GM}$ wird nur ein Tank (z.B. Tank B) eingesetzt, während bei Ladefällen mit großen Produkt $D * \overline{GM}$ beide Tanks eingesetzt werden.

- Einfluß der vertikalen Tanklage

Zwei Höhenlagen wurden untersucht, eine über und eine unter dem Punkt O. Der Vergleich SB1222, S1222 und S1122 läßt uns erkennen, daß die höhere Tanklage (negative h_R) wirksamer ist. Die vertikale Lage des Tanks ist von größerer Bedeutung und dies ist auch durch Versuche erwiesen.

Die Amplitude der Wasserbewegung steigt beträchtlich, wenn der Tank von einem Punkt unter O auf einen Punkt oberhalb O verlegt wird.

In solchen Fällen, wo die Höhenlage des Tanks im Schiff frei wählbar ist, sollte der Tank möglichst hoch im Schiff angeordnet werden.

- Einfluß der Tankwasserdämpfung

Für die berechneten Fälle (SA1221 und SA1222) erhöht die größere Dämpfung die Rollamplitude und verschlechtert die Rollreduzierung.

3.3 mit quaderförmigem Schlingerdämpfungstank

Bild 12 und Bild 13 zeigen die berechneten Zeitfunktionen (z.B. Rollwinkel und Beschleunigung parallel zum Deck). Bild 14 zeigt die Entstehung von Wassersprüngen (2 Perioden). Wassersprung tritt bei Resonanz (wenn Erregerfrequenz und Tankeigenfrequenz zusammenfallen) auf und bewegt sich periodisch zwischen den Tankwänden. Man erkennt, daß Wassersprünge sehr oft auftreten. In Bild 15 — Bild 18 werden das x-Moment, die y-Kraft, Wassererhebungen $\Delta h = h - h_0$ bei $y = 0$ und Wassergeschwindigkeit v bei $y = 0$ über der Zeit aufgetragen. Die Überschreitungshäufigkeitsverteilung der Rollwinkel zeigt Bild 19.

Nach den Ergebnissen der Simulationsrechnungen liegt die erreichbare Rollreduktion für dieses Schiff zwischen 45% und 75%. Die Rollreduktionen sind höher als erwartet. Außerdem, stellt man fest, daß die Tankdeckenhöhe mindestens 4 mal die Wasserhöhe sein muß.

- Einfluß des natürlichen Seegangs

Man erkennt, daß bei Fahrt und ohne Fahrt des Schiffes in achterlichem Seegang oder bei See seitlich, eine beträchtliche Rollreduzierung erzielt werden kann. Bei Fahrt des Schiffes in See von vorne ist die Wirkung des Tanks relativ klein.

- Einfluß der vertikalen Tanklage

Die größte Rollreduzierung wird durch eine hohe Tanklage erreicht. Wenn der Tank höher liegt, ist das Moment größer und die Rollbewegungen kleiner. Deshalb muß der Tank so hoch wie möglich über Punkt O liegen.

- Einfluß der Tanklänge

Es ist verständlich, daß die Wasserbewegung in einer 2-dimensionalen Ebene senkrecht zur Längsrichtung steht. Deswegen ist das erzeugte Moment auch direkt proportional zur Tanklänge. Geringere Tanklänge heißt geringere Rollreduzierung.

4 Schlußbemerkung

Die Simulationsergebnisse für das Schiff mit U-förmigem Tank sind als relativ plausibel zu betrachten. Sie liegen innerhalb der erwarteten Grenzen.

Aus den Simulationsergebnissen erkennt man, daß die Wirksamkeit von quaderförmigen Tanks in unregelmäßigem Seegang größer ist als die von U-förmigen Tanks. Man kann daher vermuten, daß die größere Wassermenge und die Entstehung von Wassersprüngen in quaderförmigen Tanks (bei gleichen Tanklänge und Tankbreite) zu einer stärkeren Verringerung des Rollwinkels führt.

Wegen der vielen Parameter, die bei solchen Berechnungen variiert werden müssen, bevor praktische Konsequenzen aus derartigen Rechnungen gezogen werden können, dürften erhebliche Rechnerzeiten nötig sein.

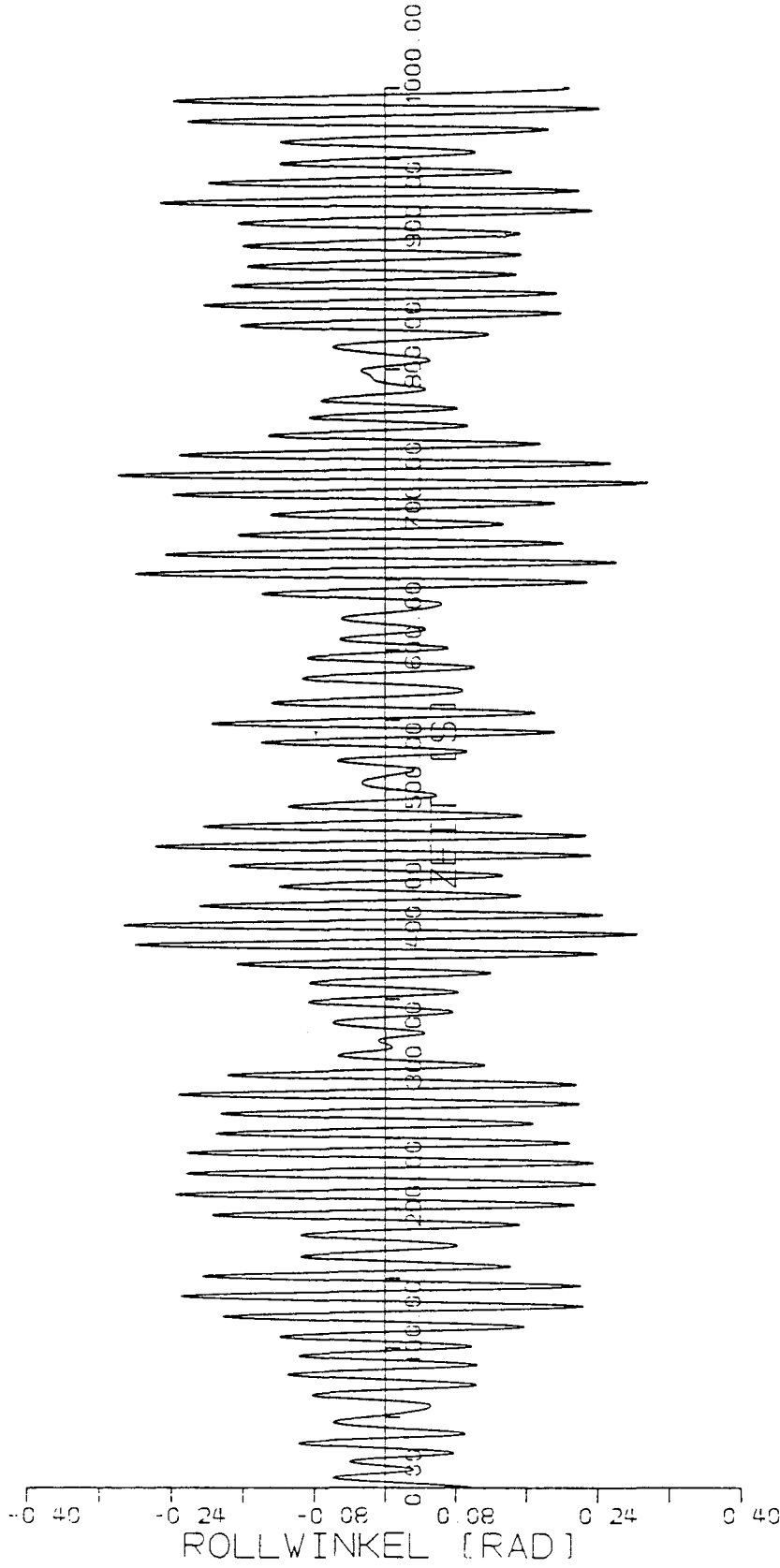
Die Rechnerzeit beträgt für die Simulation der Rollbewegung des Schiffes ohne Tank (mit einem Zeitschritt von 0.5 s) ca. 0.09 s CPU-Zeit je Sekunde Simulationszeit auf einer VAX11/780.

Für den Fall mit U-förmigem Tank dauert die Simulationsrechnung ungefähr so lang wie für den Fall ohne Tank.

Die Simulation der Rollbewegung eines Schiffes im Seegang mit Wasserbewegung in einem quaderförmigen Tank (Tankbreite = 24.6 m in 25 Abschnitte eingeteilt, und mit einem Zeitschritt von maximal 0.02 s für die Wasserbewegung und 0.5 s für die Rollbewegung) erfordert auf der VAX11/780 ca. 1 Sekunde CPU-Zeit pro Sekunde Simulationszeit.

5 Literaturverzeichnis

- /1/ H. S. Koh : Simulation der Rollbewegungen eines Schiffes ohne und mit Schlingerdämpfungstank im Seegang. Diplomarbeit (Sept. 1985), Institut für Schiffbau der Universität Hamburg
- /2/ H.-P. Kröger : Simulation von Schiffen im Seegang. Schiffstechnik 33, Heft 4, Nov. 1986; S.187-216
- /3/ P. Blume : Experimentelle Bestimmung von Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung und ihre Anwendung zur Abschätzung extremer Rollwinkel. Schiffstechnik 1. Heft, März 1979; S.3ff
- /4/ J. H. Chadwick and K. Klotter : On the dynamics of antirolling tanks. Schiffstechnik 8. Heft, 2. Band, Febr. 1954; S.85-104
- /5/ J. Dillingham : Motion studies of a vessel with water on deck. Marine Technology, Vol. 18, No. 1, Jan. 1981; S.38-50
- /6/ F. Petey : Berechnung der Flüssigkeitsbewegung in teilgefüllten Tanks und Leckräumen. Schiffstechnik 32, Heft 2, Juni 1985; S.51-67

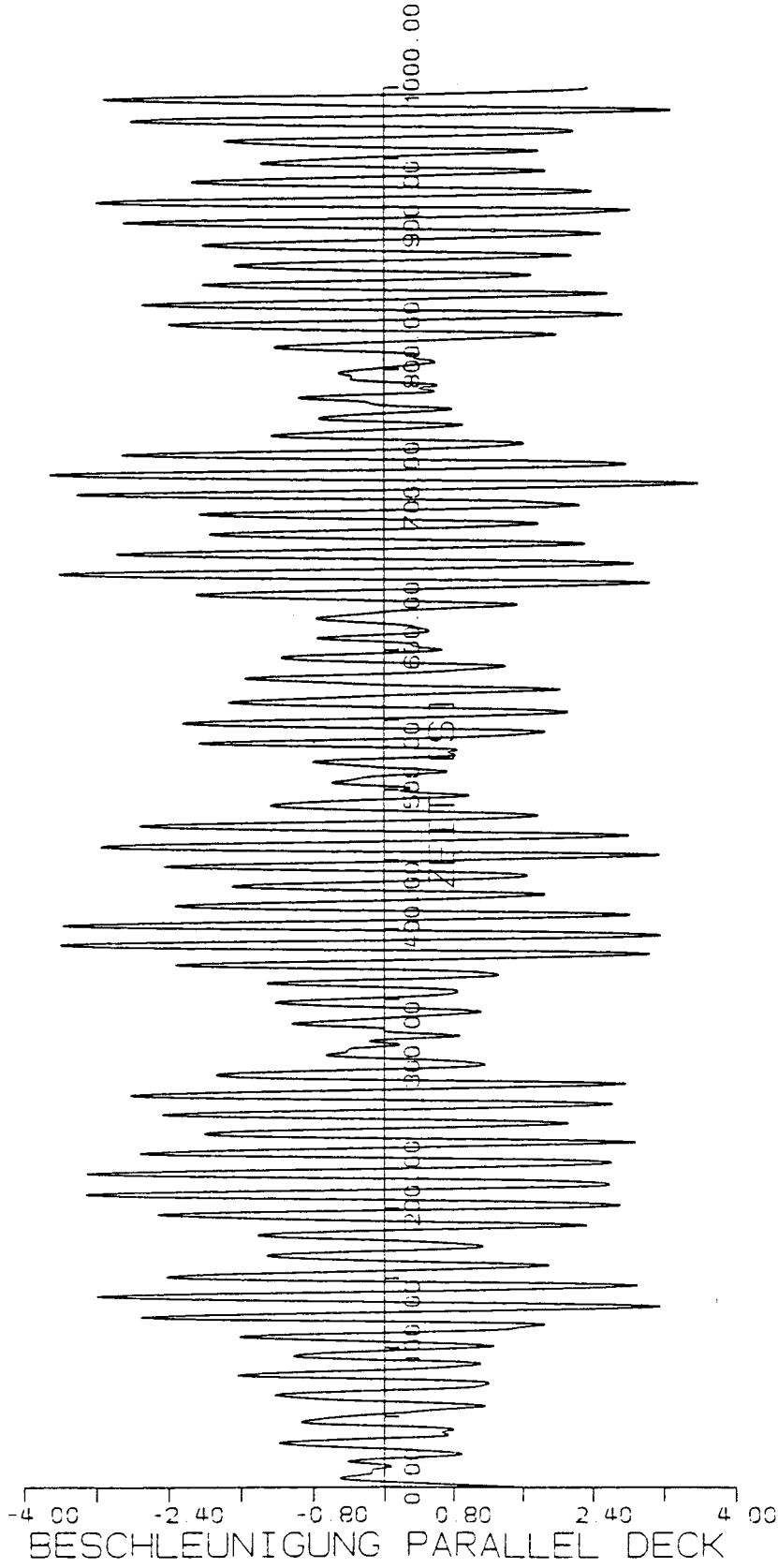


SCHIFFSMASSE <T>	15886.00	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE <M>	5.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.21	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00

IFS - HAMBURG
24-OCT-85

KOH

OHNE SCHLINGERDAEMPfungSTANK



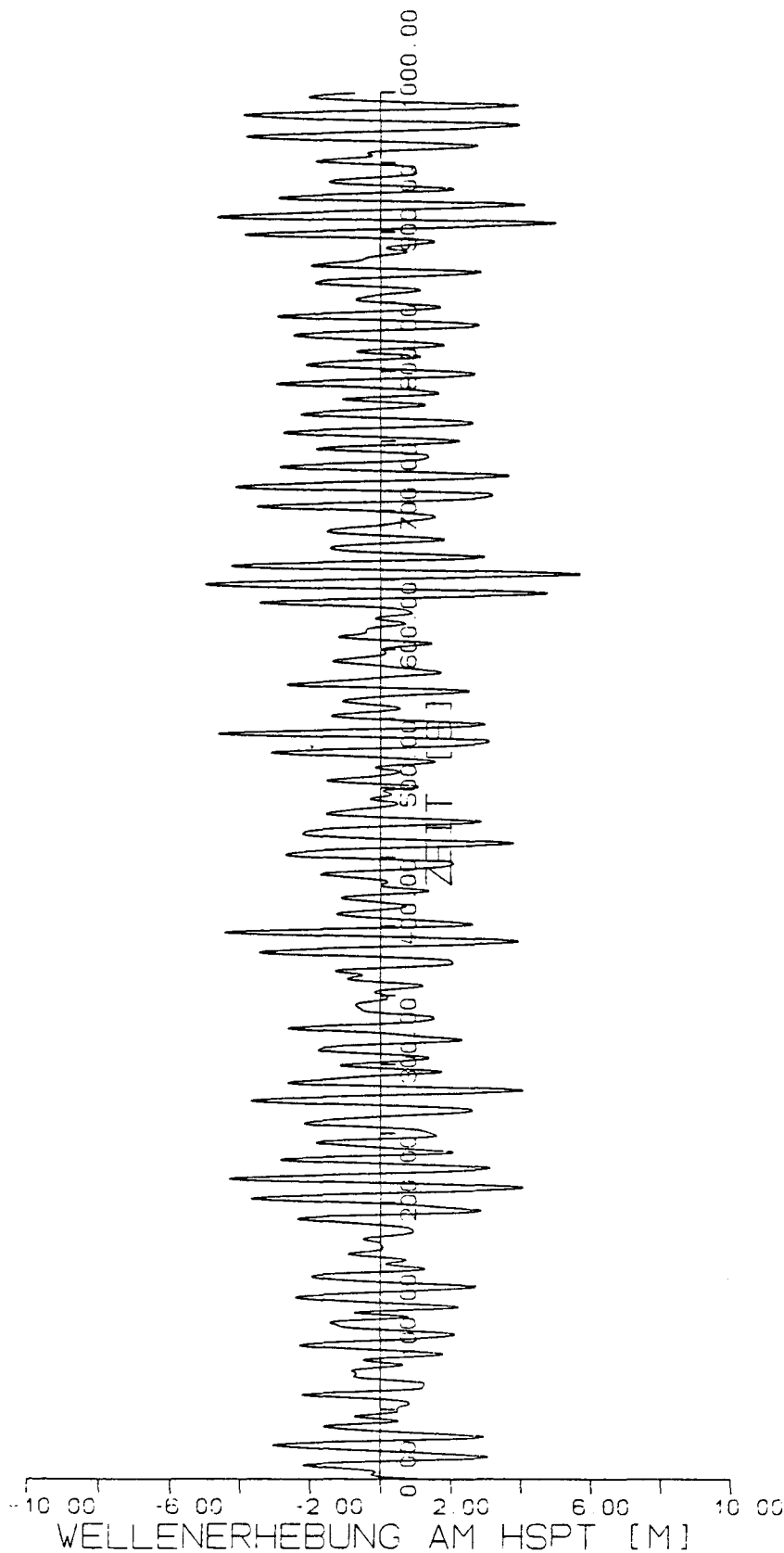
SCHIFFSMASSE <T>	15886.00	KENNZEICHENDE WELLENHOEHE <M>	5.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.21	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00

IFS - HAMBURG

24-OCT-85

K9H

OHNE SCHLINGERDAEMPfungSTANK



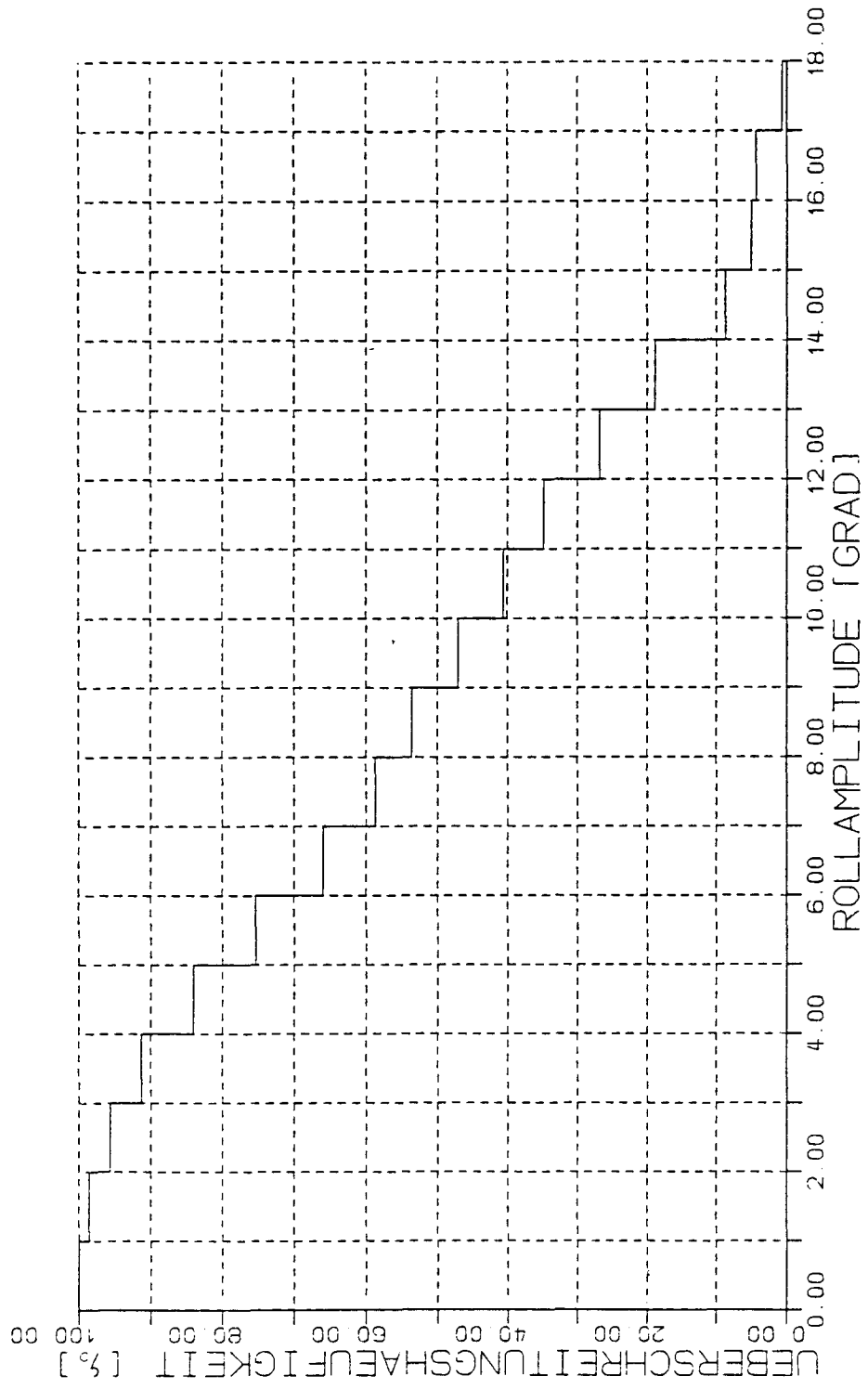
SCHIFFSMASSE <T>	15886.00	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE <M>	5.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.21	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00

IFS - HAMBURG

24-OCT-85

KQH

OHNE SCHLINGERDAEMPfungSTANK



KENNZEICHENDE ROLLAMPLITUDE ~ 13.40 GRAD
 FLAECHE UNTER DER KURVE ~ 910.14

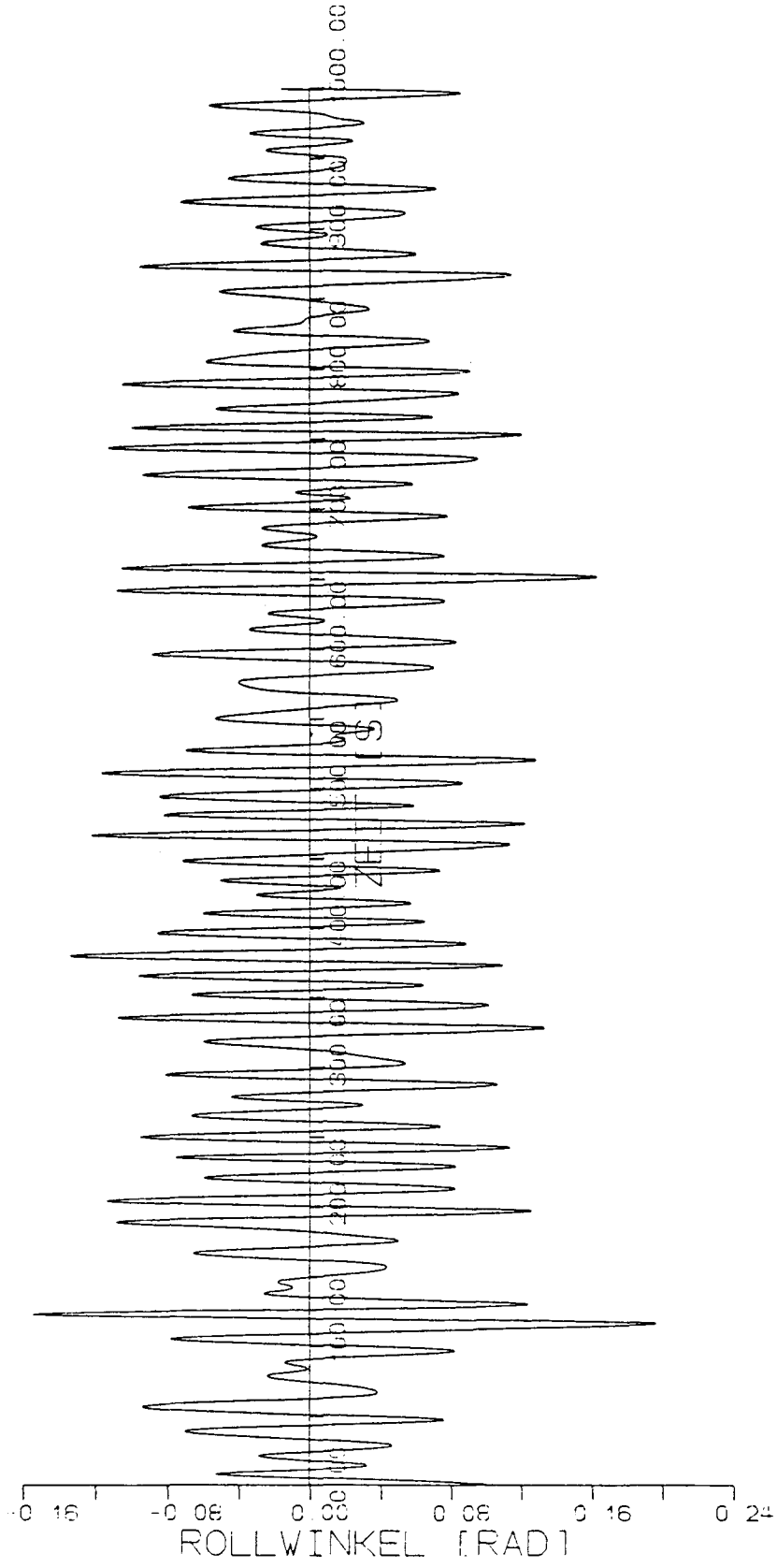
SCHIFFSMASSE <T>	15886.00	KENNZEICHENDE WELLENHOEHE <M>	5.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.21	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00

IFS - HAMBURG
 24-OCT-85 KOH
 OHNE SCHLINGERDAEMPfungSTANK

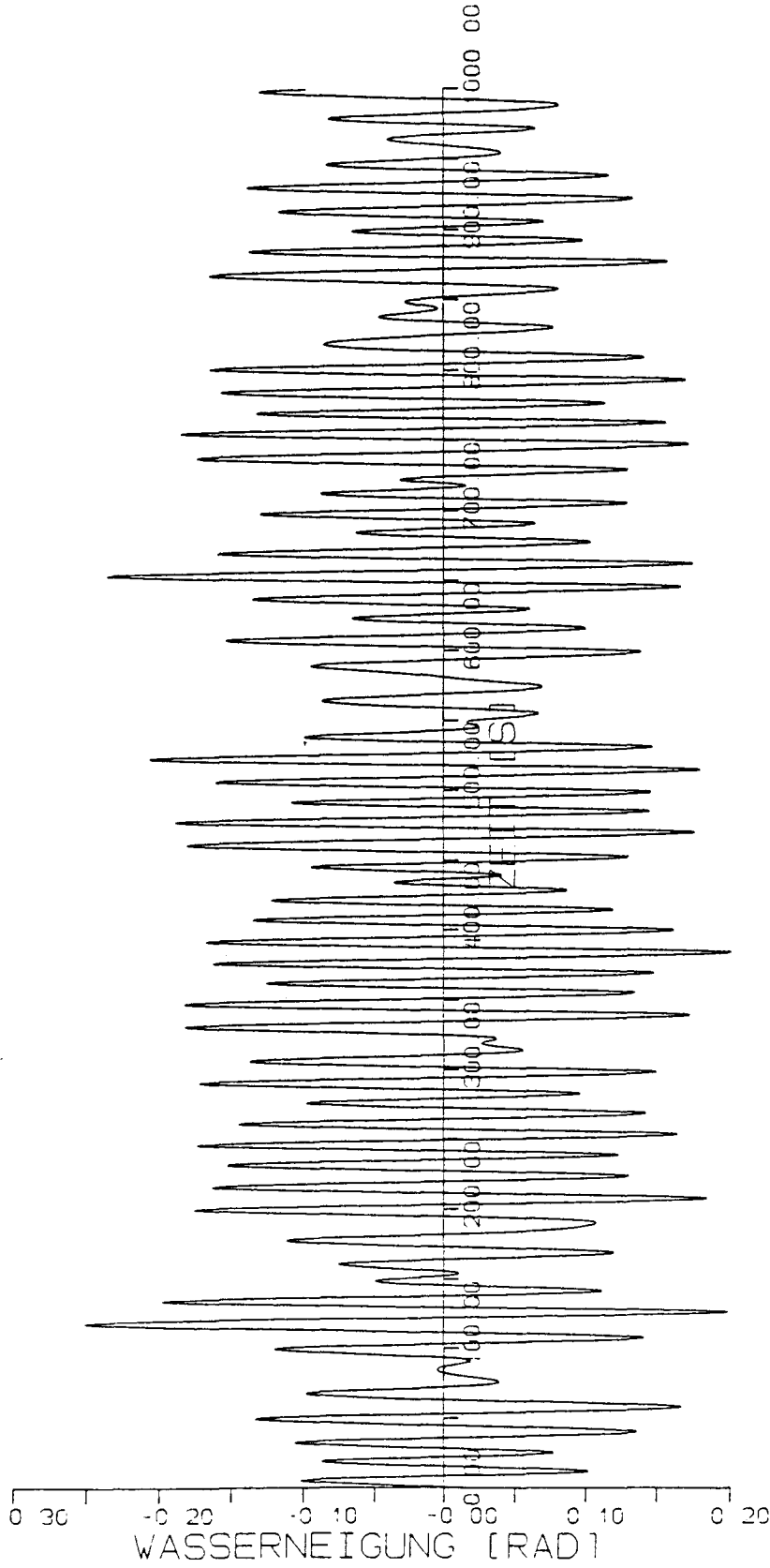
Tabelle 2

Rechenkonfigurationen mit U-förmigem Tank

			S1221	S1212	S1222	S1232	SA1221	SA1222	S1321	SB1222	S2212	S1222	S2232	SA2212	S1721	S1722	SA1721	S1822		
LADEFALL	1	$m_s = 15\,886\text{ t}$ $\overline{GM} = 1,52\text{ m}$ $T = 6,98\text{ m}$ $t = 0,46\text{ m}$ $KG = 10,83\text{ m}$	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●						
	2	$m_s = 19\,573\text{ t}$ $\overline{GM} = 0,86\text{ m}$ $T = 8,17\text{ m}$ $t = -0,23\text{ m}$ $KG = 11,45\text{ m}$													●	●	●	●		
TANK	1	$\theta_t = 350,7 \cdot 10^6\text{ Kg m}^2$ $d_t = 1411,5 \cdot 10^6\text{ N m s}^2$ $m_t = 306,8\text{ t}$ $l_t = 9\text{ m}$	$h_R = 6,08\text{ m}$				$h_R = 10,22\text{ m}$				$h_R = 6,08\text{ m}$				$h_R = 7,42\text{ m}$					
	2	$\theta_t = 350,7 \cdot 10^6\text{ Kg m}^2$ $d_t = 2823 \cdot 10^6\text{ N m s}^2$ $m_t = 306,8\text{ t}$ $l_t = 9\text{ m}$					●	●						●			●			
	3	$\theta_t = 233,8 \cdot 10^6\text{ Kg m}^2$ $d_t = 941 \cdot 10^6\text{ N m s}^2$ $m_t = 204,5\text{ t}$ $l_t = 6\text{ m}$							●	$h_R = 6,04\text{ m}$									●	$h_R = 7,38\text{ m}$
SEEGANG	1	$H_{1/3} = 1,88\text{ m}$ $T_m = 8,8\text{ s}$									●	●	●	●						
	2	$H_{1/3} = 5\text{ m}$ $T_m = 12,4\text{ s}$	●	●	●	●	●	●	●	●						●	●	●	●	
GESCHW.	1	$v = 0\text{ kn}$	●				●		●						●		●			
	2	$v = 15\text{ kn}$		●	●	●		●		●	●	●	●	●		●		●		
REL. KURS	1	$\mu = 45^\circ$		●							●			●						
	2	$\mu = 90^\circ$	●		●	●	●	●	●	●		●			●	●	●	●		
	3	$\mu = 135^\circ$				●							●							
KOLLWINKEL [GRAD]	1	Mittelwert φ_m	-0,20	0,23	-0,02	0,09	-0,06	-0,02	-0,06	0,02	-0,12	0,01	0,03	-0,12	-0,02	-0,06	-0,02	-0,06		
	2	RMS Wert φ_{RMS}	2,88	3,26	3,28	1,79	3,47	3,28	3,55	2,31	1,90	1,62	0,97	1,91	0,87	1,10	0,87	1,33		
	3	Maximaler Wert φ_{Max}	7,61	14,26	9,85	4,82	8,03	11,66	8,13	6,71	8,05	5,59	3,15	8,04	3,92	4,21	3,29	4,36		
	4	Kennzeichnender Wert $\varphi_{1/3}$	5,80	6,40	6,39	3,38	6,69	6,39	7,26	4,55	3,61	3,26	1,88	3,69	1,75	2,25	1,78	2,69		
	5	Rollreduktion von $\varphi_{1/3}$ in %	60,8	52,4	52,3	35,7	54,7	52,3	50,9	66,0	57,4	52,4	-ve	56,5	46,6	69,6	45,7	63,7		



SCHIFFSMASSE <T>	16193.00	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE <M>	5.00	TANKLAENGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	6.08
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.07	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	45.00	TANKEIGENPERIODE <S>	14.00
IFS - HAMBURG					
7-OCT-86					
MIT U-FOERMIGEM TANK					
K9H					



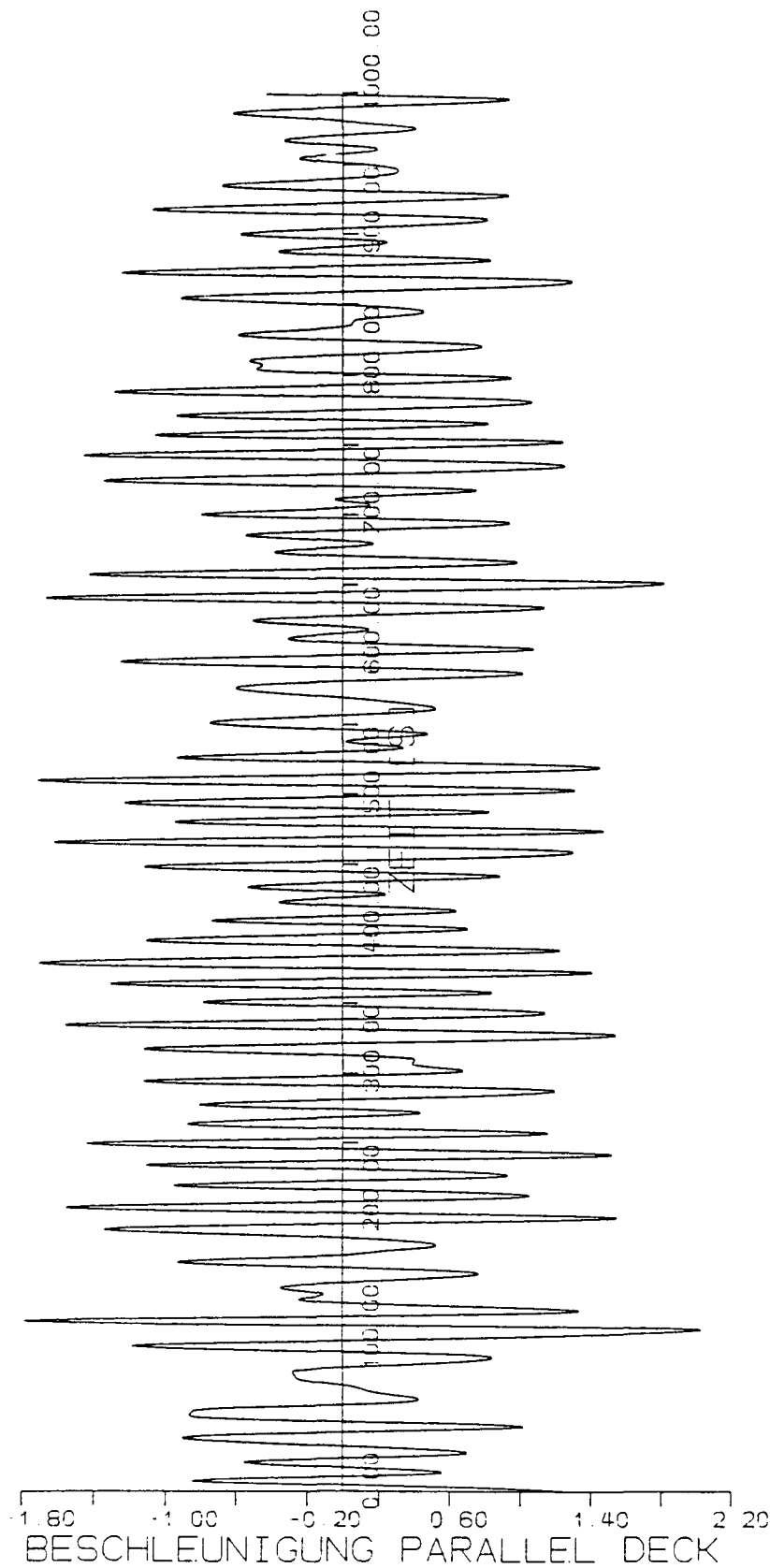
SCHIFFSMASSE <T>	16193.00	KENNZEICHNENDE WELLENHÖHE <M>	5.00	TANKLÄNGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	6.08
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.07	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	45.00	TANKEIGENPERIODE <S>	14.00

IFS - HAMBURG

7-OCT-86

K9H

MIT U-FÖRMIGEM TANK



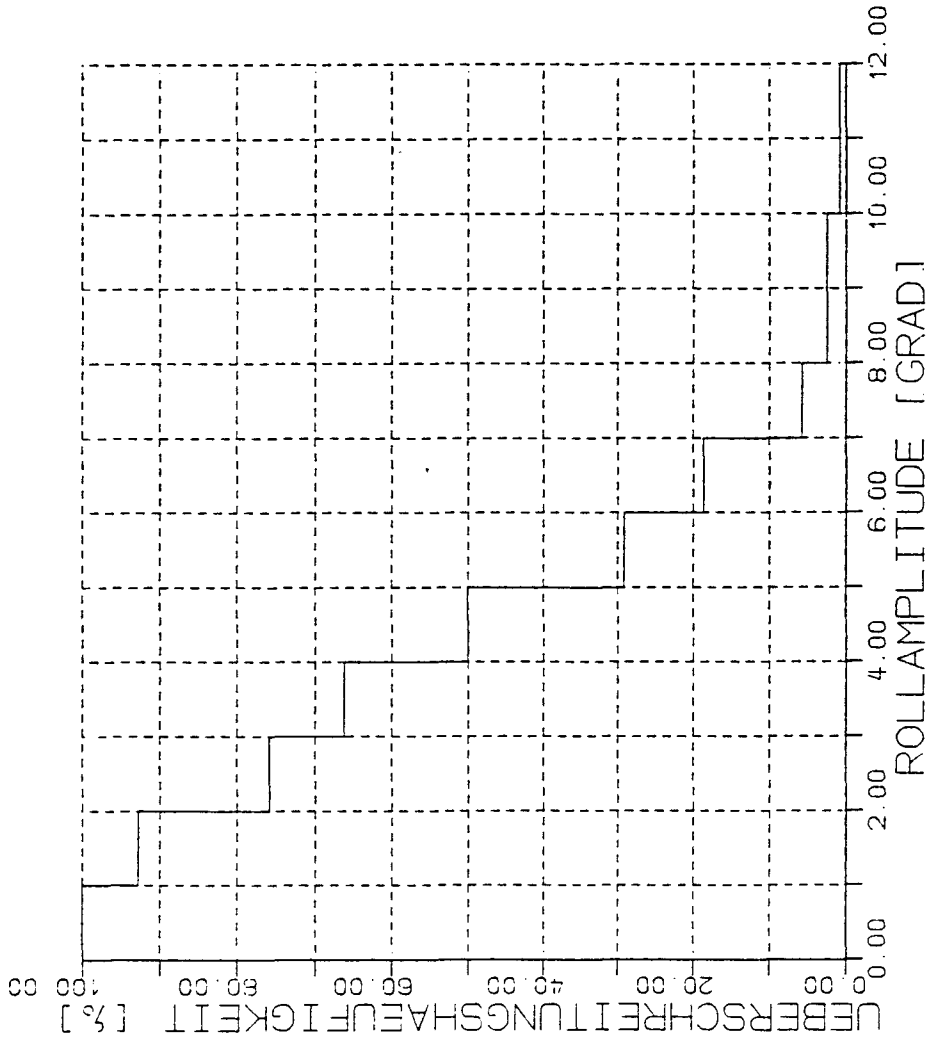
SCHIFFSMASSE <T>	16193.00	KENNZEICHENDE WELLENHOEHE <M>	5.00	TANKLAENGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	6.08
SCHIFFSFIGENPERIODE <S>	15.07	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	45.00	TANKEIGENPERIODE <S>	14.00

IFS - HAMBURG

7-OCT-86

KOH

MIT U-FOERMIGEM TANK



KENNZEICHENDE ROLLAMPLITUDE = 6.40 GRAD
 FLAECHE UNTER DER KURVE = 444.35

SCHIFFSMASSE <T>	16193.00	KENNZEICHENDE WELLENHOEHE <M>	5.00	TANKLAENGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	6.08
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.07	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	45.00	TANKEIGENPERIODE <S>	14.00

IFS - HAMBURG

7-OCT-86

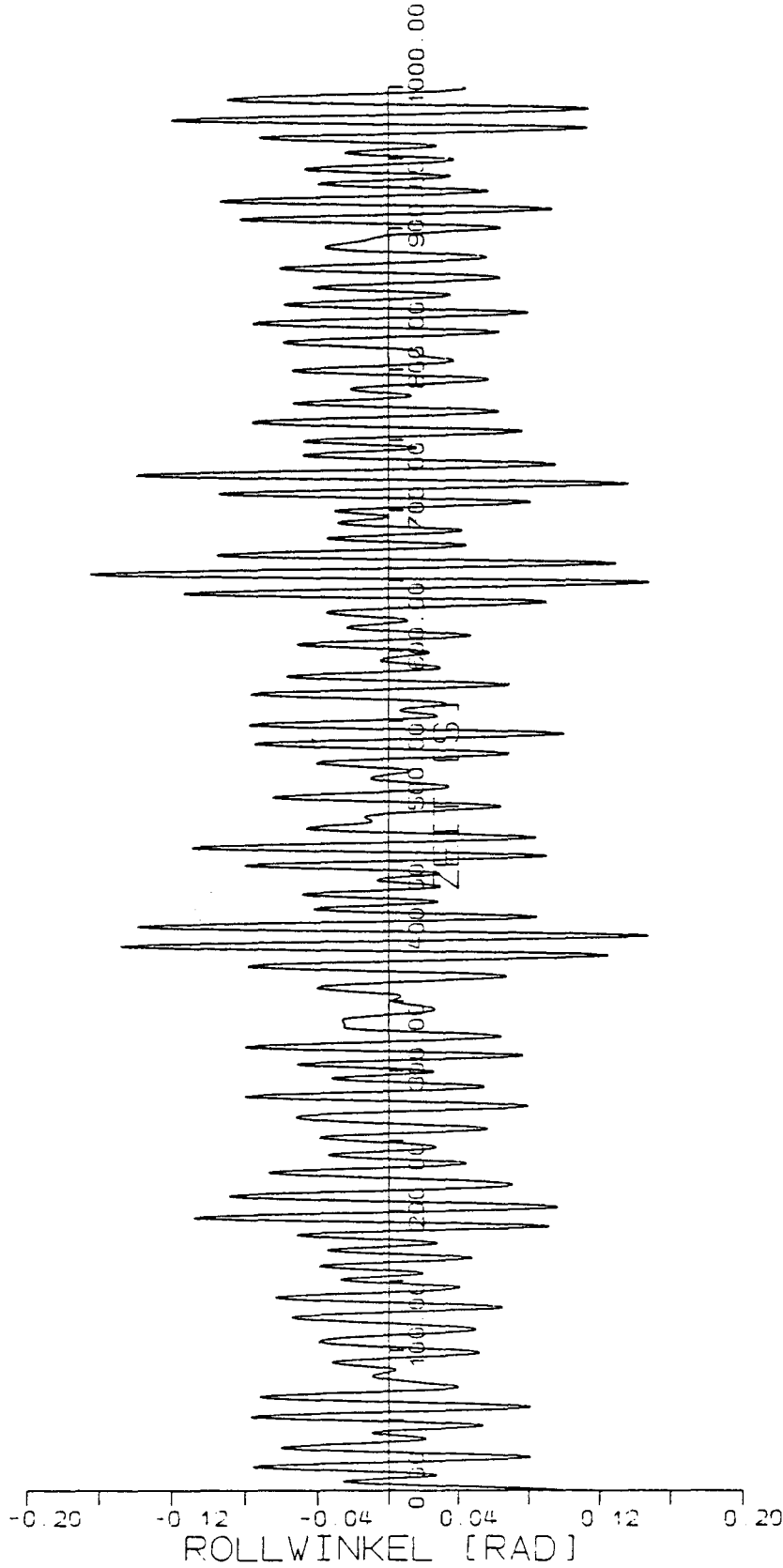
K9H

MIT U-FOERMIGEM TANK

Tabelle 3

Rechenkonfigurationen mit quaderförmigem Tank

			S1411	S1421	S1412	S1422	S1432	SA1421	SA1422	S1521	S1912	S1922	S1932	S1921	SA1921	
LADEFALL	1	$m_s = 15\,886\text{ t}$ $\overline{GM} = 1,52\text{ m}$ $T = 6,98\text{ m}$ $t = 0,46\text{ m}$ $KG = 10,83\text{ m}$	●	●	●	●	●	●	●	●						
	2	$m_s = 19\,573\text{ t}$ $\overline{GM} = 0,86$ $T = 8,17\text{ m}$ $t = -0,23\text{ m}$ $KG = 11,45\text{ m}$									●	●	●	●	●	
TANK	1	$m_t = 217\text{ t}$ $h = 1,0\text{ m}$ $b = 24,6\text{ m}$ $L = 9\text{ m}$	S = -7,07 m								S = -8,41 m					
	2	$m_t = 217\text{ t}$ $h = 1,0\text{ m}$ $b = 24,6\text{ m}$ $L = 9\text{ m}$ $s = 9,23\text{ m}$						●	●							●
	3	$m_t = 144,6\text{ t}$ $h = 1\text{ m}$ $b = 24,6$ $L = 6\text{ m}$ $s = -7,05\text{ m}$								●						
SEEGANG	1	$H_{1/3} = 1,88\text{ m}$ $T_m = 8,8\text{ s}$														
	2	$H_{1/3} = 5\text{ m}$ $T_m = 12,4\text{ s}$	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
GESCHW.	1	$v = 0\text{ Kn}$	●	●				●		●				●	●	
	2	$v = 15\text{ Kn}$			●	●	●		●		●	●	●			
REL. KURS	1	$\mu = 45^\circ$	●		●						●					
	2	$\mu = 90^\circ$		●		●		●	●	●		●		●	●	
		$\mu = 135^\circ$					●						●			
ROLLWINKEL [GRAD]	1	Mittelwert φ_m	-0,05	-0,00	0,17	-0,02	0,08	0,02	0,01	-0,05	-0,07	-0,05	0,10	-0,01	-0,00	
	2	RMS Wert φ_{RMS}	2,57	2,27	2,81	2,85	1,47	1,33	1,71	3,27	1,34	1,11	1,32	0,95	0,95	
	3	Maximaler Wert φ_{max}	8,40	6,85	9,56	9,47	4,06	4,52	5,89	8,10	7,34	3,88	4,06	3,59	3,09	
	4	Kennzeichnender Wert $\varphi_{1/3}$	5,16	4,63	5,37	5,55	2,78	2,66	3,61	6,51	2,57	2,17	2,32	1,83	1,82	
	5	Rollreduktion $\varphi_{1/3}$ in %	61,1	68,7	60,0	58,6	47,2	82,0	73,1	56,0	70,5	70,7	52,8	44,2	38,2	

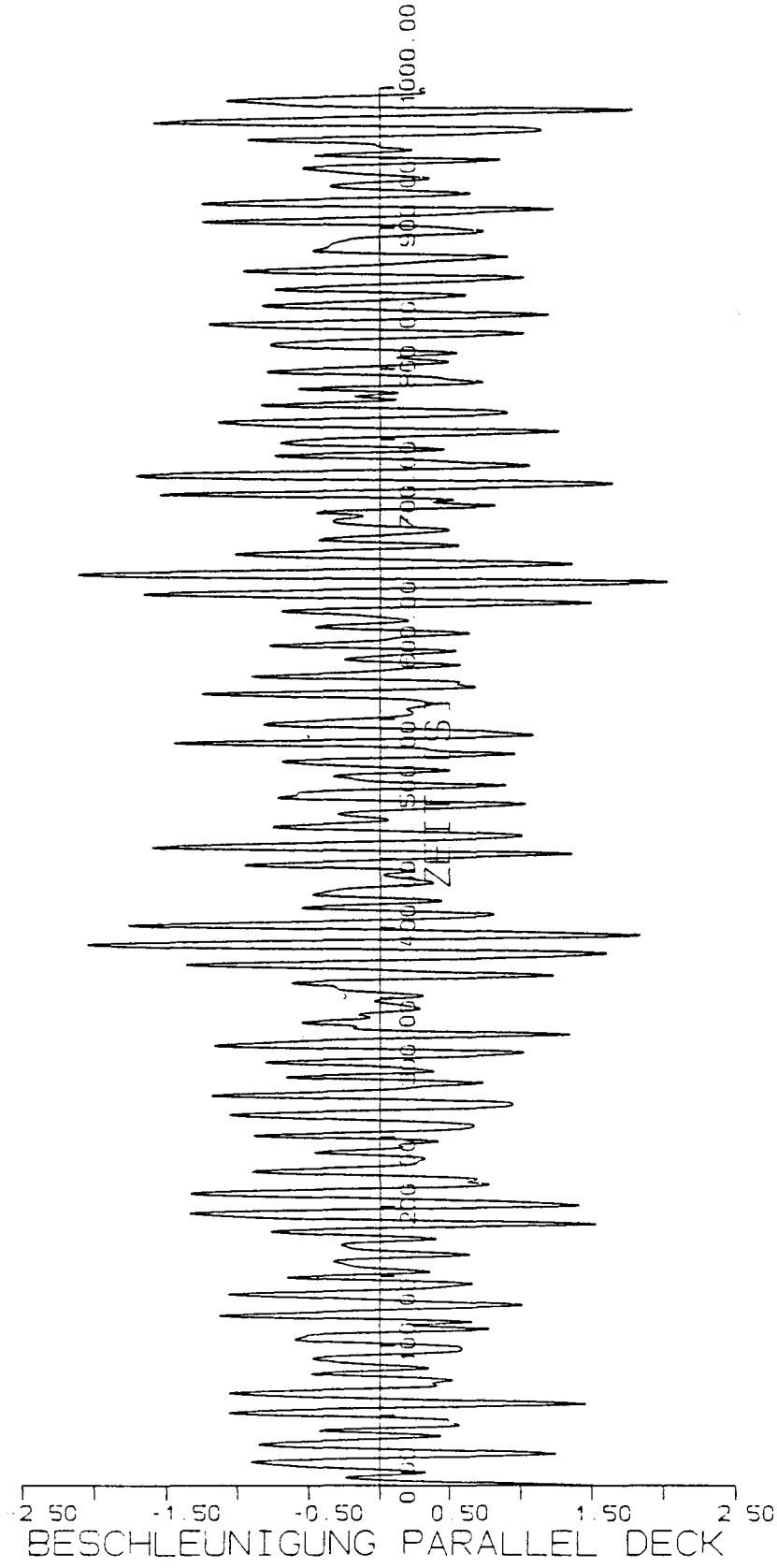


SCHIFFSMASSE <T>	16103.00	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE <M>	5.00	TANKLAENGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	-7.07
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.11	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00	TANKEIGENPERIODE <S>	15.75

IFS - HAMBURG
25-OCT-85

MIT QUADERFOERMIGEM TANK

KOH



SCHIFFSMASSE <T>	16103.00	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE <M>	5.00	TANKLAENGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	-7.07
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.11	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00	TANKEIGENPERIODE <S>	15.75
IFS - HAMBURG 25-OCT-85 MIT QUADERFOERMIGEM TANK KOH					



ZEIT- 75.52 PHI- 0.03



ZEIT- 95.52 PHI- 0.01



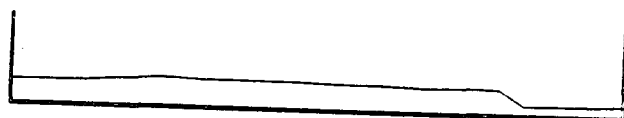
ZEIT- 80.52 PHI- -0.01



ZEIT- 100.52 PHI- 0.04



ZEIT- 85.52 PHI- 0.00



ZEIT- 105.51 PHI- -0.04

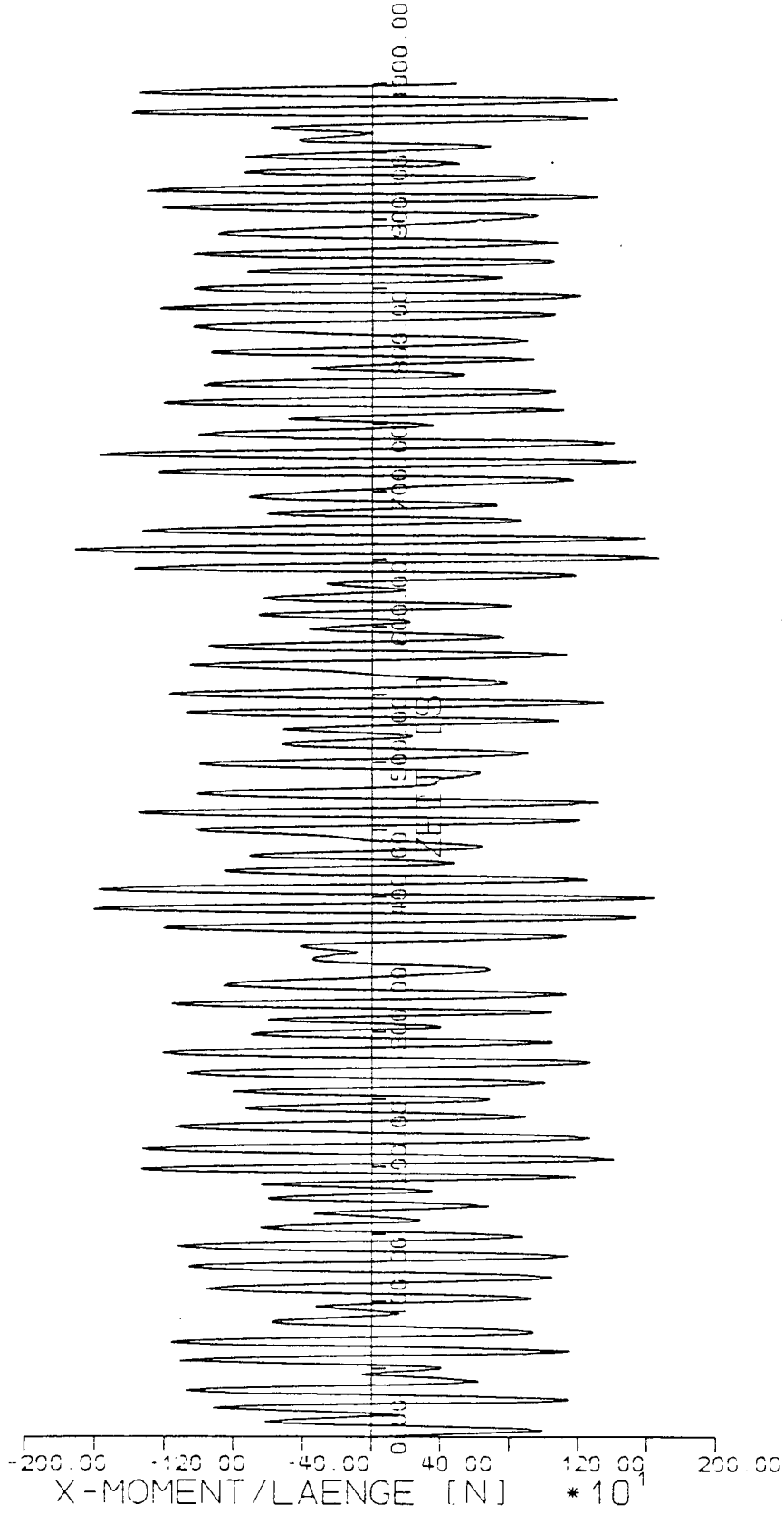


ZEIT- 90.52 PHI- -0.03



ZEIT- 110.51 PHI- -0.01

WASSERBEWEGUNGEN IM TANK



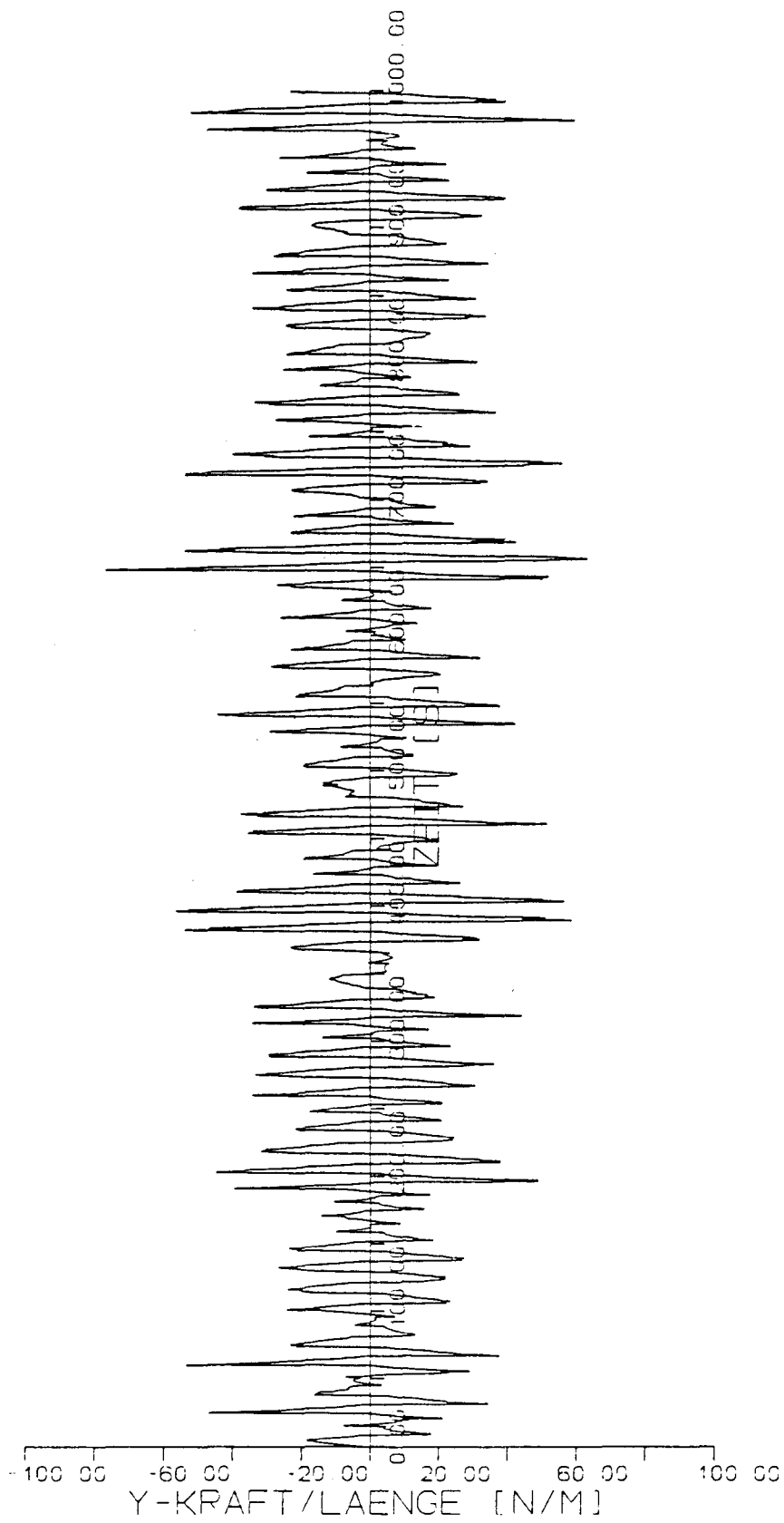
SCHIFFSMASSE <T>	16103.00	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE <M>	5.00	TANKLAENGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	-7.07
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.11	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00	TANKEIGENPERIODE <S>	15.75

IFS - HAMBURG

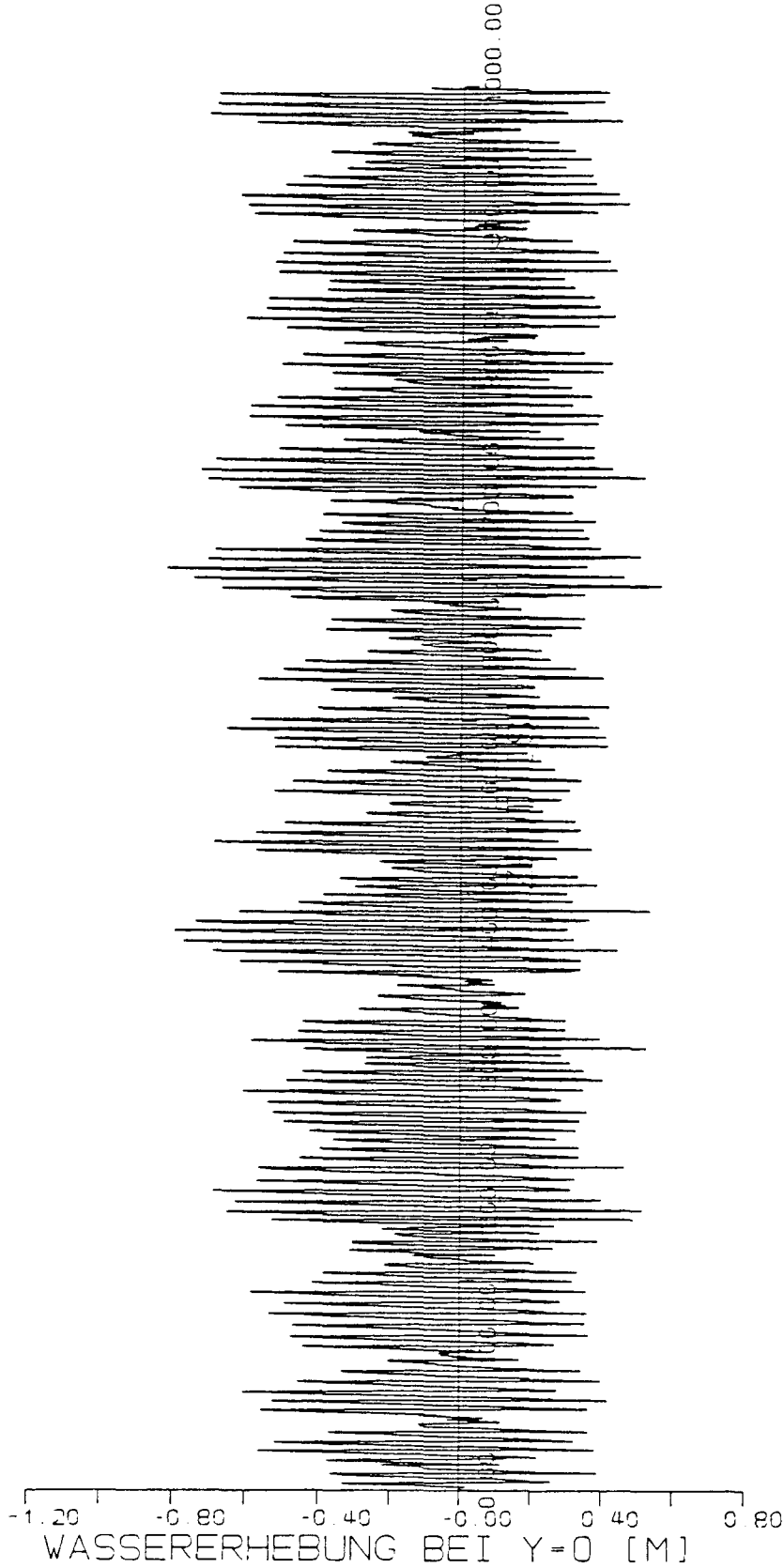
25-OCT-85

MIT QUADERFOERMIGEM TANK

KOH



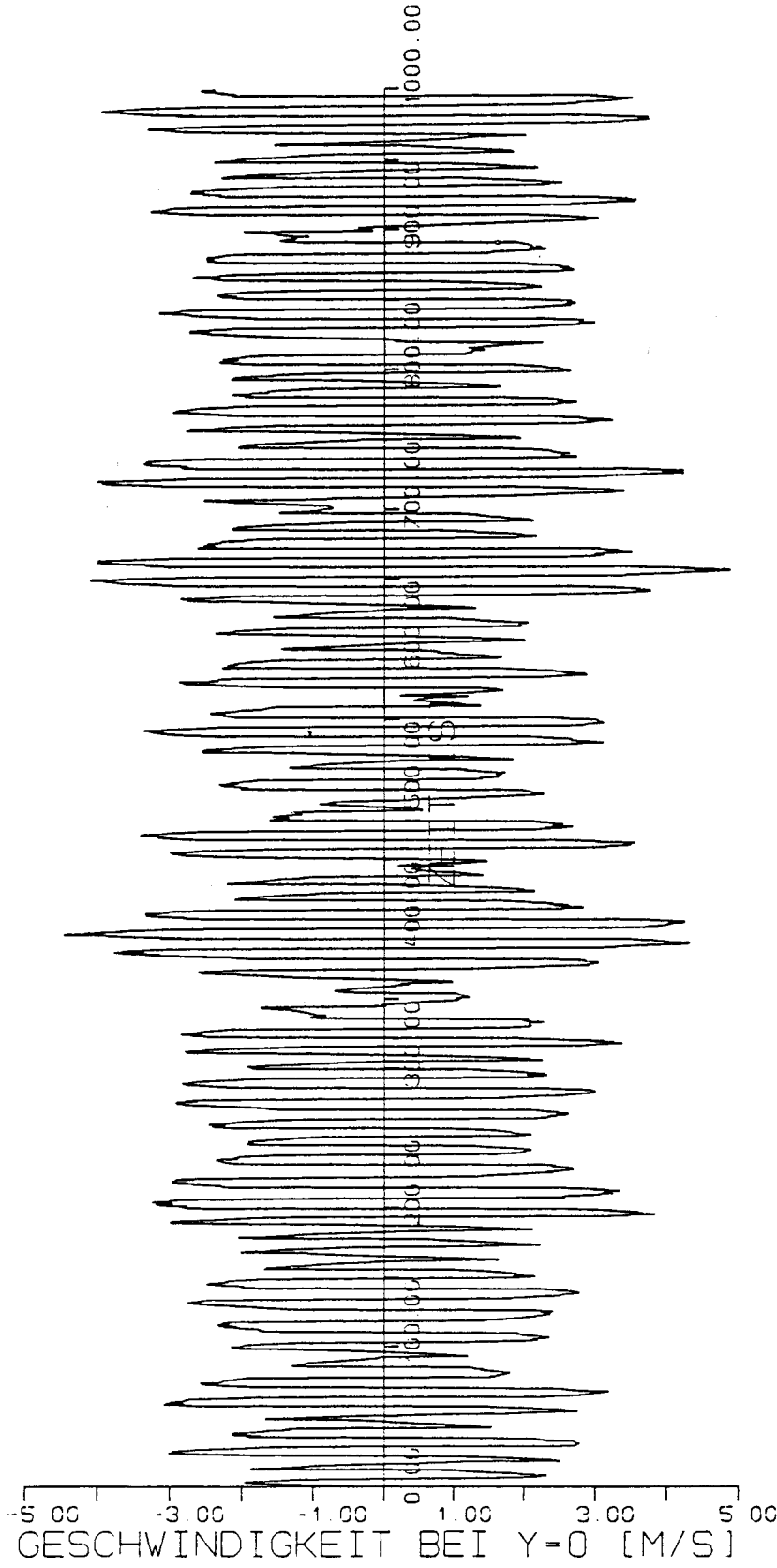
SCHIFFSMASSE <T>	16103.00	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE <M>	5.00	TANKLAENGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	-7.07
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.11	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00	TANKEIGENPERIODE <S>	15.75
IFS - HAMBURG			MIT QUADERFOERMIGEM TANK		
25-OCT-85			KOH		



SCHIFFSMASSE <T>	16103.00	KENNZEICHNENDE WELLENHOEHE <M>	5.00	TANKLAENGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	-7.07
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.11	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00	TANKEIGENPERIODE <S>	15.75

IFS - HAMBURG
25-OCT-85
MIT QUADERFOERMIGEM TANK

K9H



SCHIFFSMASSE <T>	16103.00	KENNZEICHNENDE WELLENHÖHE <M>	5.00	TANKLÄNGE <M>	9.00
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT <KN>	15.00	MODAL PERIODE <S>	12.40	TANKLAGE VOM DREHPUNKT <M>	-7.07
SCHIFFSEIGENPERIODE <S>	15.11	BEGEGNUNGSWINKEL <GRAD>	90.00	TANKEIGENPERIODE <S>	15.75

IFS - HAMBURG
25-OCT-85

MIT QUADERFOERMIGEM TANK

KOH