Experimentelle Lösung von kritischen, wellenerregten Schiffskörperschwingungen durch Eigenwert-Analyse

R. Wereldsma, Technische Hochschule Delft

EINLEITUNG

Schiffsbewegungen (Stampfen und Tauchen), Durchbiegungen (Sagging und Hogging) und Schiffskörperschwingungen können mittels eines Eigenwertverfahrens allgemein analysiert werden /1/. Diese Methode basiert auf einer Koordinatentransformation nach natürlichen Koordinaten oder den Deformationen, die sich während der unterschiedlichen freien Schwingungen des Systems einstellen.

In diesem Bericht werden nur die Vertikal-Schwingungen, -Durchbiegungen und -Bewegungen betrachtet. Durch einen speziellen segmentierten Oszillator wird es möglich, die hydrodynamische Koeffizienten (Masse und Dämpfung) in einer verallgemeinerten Form experimentell zu bestimmen und damit die Lösung des Schiffsbewegungs-, Schiffsdurchbiegungs- und Schiffsschwingungsproblems zu verbessern.

PROBLEMBESCHREIBUNG IN SCHIFFSKOORDINATEN

Für diese Beschreibung wird das Schiff angenähert durch eine Masse- und Steifigkeitsdiskretisierung. (Nach Bishop /2/ wird das reine, mechanische Problem unterschieden vom hydrodynamischen Problem: "Dry Ship" und "Wet Ship").

In Bild 1 ist eine vereinfachte Modellierung für die Vertikalbewegungen angegeben. Der Ansatz hat in diesem Fall sechs Freiheitsgrade: eine Schiffbewegung (Tauchen) und fünf unterschiedliche Durchbiegungen. Ein ähnlicher Ansatz ist möglich für die Verdrehungen der Elemente (Stampfen und Biegungsverzerrungen).

Dieses rein mechanische Problem kann für die Statik und Dynamik in gekürzter Form geschrieben werden als:

$$\left[\bar{S}\right]\{x\} + \left[\bar{M}\right]\{\ddot{x}\} = \{F\} \qquad (1)$$

$\left[\bar{S}\right]$ ist die Steifigkeitsmatrix, die die elastischen Eigenschaften des Schiffskörpers berücksichtigt.

$\left[\bar{M}\right]$ ist die diagonalisierte Massenmatrix.

$\{F\}$ ist der Vektor der hydrodynamischen Erregung durch die Wellen.

Weil sich das Schiff im Wasser befindet, muss Gleichung (1) komplettiert werden durch die Effekte des Wassers, d.h.: hydrodynamische Masse, Dämpfung und Verdrängungskräfte.

Ein Teil der Wellenerregung wird gebraucht für die Beschleunigung des Wassers (hydrodynamische Masse), für die Reibungsverluste (Dämpfung) und die Wasserverdrängung (hydrodynamische Steifigkeit).

Das vollständige Gleichungssystem ("Wet Ship Equation") kann von Gleichung (1) abgeleitet werden durch die oben erwähnte Korrektur, das heisst die Wellenerregung um die Wasserkräfte zu verringern.

Dann entsteht das Gleichungssystem:

$$\underbrace{\left[\bar{S}\right]\{x\} + \left[\bar{M}\right]\{\ddot{x}\}}_{\text{mechanisches System}} = \underbrace{\{F\}}_{\text{Wellen-erregung}} \underbrace{- \left[\bar{\mathcal{M}}\right]\{\ddot{x}\} - \left[\bar{\mathcal{C}}\right]\{\dot{x}\} - \left[\bar{\mathcal{S}}\right]\{x\}}_{\text{hydrodynamische Effekte}} \qquad (2)$$

Wenn die Elemente der Matrizen und der Vektor der Wellenerregung bekannt sind, können die Gleichungen gelöst werden. Durch die starke Kopplung der Gleichungen (von den Koeffizientenmatrizen ist nur der Massenmatrix diagonalisiert) ist ein übersichtliches Verständnis des Verhaltens nicht gut möglich. Um die Übersichtlichkeit zu verbessern, können die Gleichungen transformiert werden in natürliche Koordinaten.

BESCHREIBUNG IN "NATÜRLICHEN KOORDINATEN"

Um die "Schiffskoordinaten" in "Natürliche Koordinaten" zu transformieren, muss die Schiffsbalkendeformation $\{x\}$ zusammengesetzt werden aus einer Reihe von "natürlichen Auslenkungen". Diese Auslenkungen sind die Schiffsbewegungen und Schwingungsdurchbiegungen des Schiffskörpers (die hydrodynamischen Effekte werden dabei nicht betrachtet; "Dry Ship") und sind - multipliziert mit der Massenverteilung - orthogonal zu einander /1/.

Die Transformation schreibt sich in Matrixformulierung:

$$\begin{Bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{00} & T_{01} & T_{02} & T_{03} & T_{04} \\ T_{10} & T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{20} & T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{30} & T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{40} & T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \end{Bmatrix} \text{ oder gekürzt: } \{x\} = [T]\{\psi\} \qquad (3)$$

Typ der Auslenkung (Spalten von links nach rechts): Tauchen, Stampfen, 2 Knoten-Biegung, 3 Knoten-Biegung, 4 Knoten-Biegung

Die Spalten der Transformationsmatrix sind die Ordinaten der Eigenformen. Der Vektor $\{\psi\}$ ist die Amplitude der verschiedenen Auslenkungen und $\{x\}$ ist die Durchbiegung in "Schiffskoordinaten".

Die Kräfte $\{F\}$ können auf ähnliche Weise zusammengesetzt werden aus einer Serie von "generalisierten Kräften". Die Herleitung basiert auf der Tatsache, dass eine Kraft, die wie das Produkt aus Masse und Eigenform verteilt ist, wieder dieselbe Eigenform verursacht. Diese generalisierte Kräfte mit der erwähnten Verteilung gehören zum "natürlichen Koordinatensystem". Die Kräftetransformation schreibt sich in Matrixformulierung:

$$\begin{array}{l} \text{Tauchen} \rightarrow \\ \text{Stampfen} \rightarrow \\ \text{Biegung (2 K)} \rightarrow \\ \text{Biegung (3 K)} \rightarrow \\ \text{Biegung (4 K)} \rightarrow \end{array} \begin{bmatrix} T_{00} & T_{10} & T_{20} & T_{30} & T_{40} \\ T_{01} & T_{11} & T_{21} & T_{31} & T_{41} \\ T_{02} & T_{12} & T_{22} & T_{32} & T_{42} \\ T_{03} & T_{13} & T_{23} & T_{33} & T_{43} \\ T_{04} & T_{14} & T_{24} & T_{34} & T_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Gamma_0 \\ \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \Gamma_3 \\ \Gamma_4 \end{Bmatrix}$$

$$\text{oder gekürzt: } [T]^T\{F\} = \{\Gamma\} \qquad (4)$$

Wenn die Transformation für Auslenkungen und Kräfte durchgeführt wird, entsteht die Gleichung in natürlichen Koordinaten:

$$[T]^T[S][T]\{\psi\} + [T]^T[\overline{M}][T]\{\ddot{\psi}\} = \{\Gamma\} - [T]^T[\overline{\mathit{M}}][T]\{\ddot{\psi}\} - [T]^T[\overline{\mathit{C}}][T]\{\dot{\psi}\} - [T]^T[\overline{\mathit{S}}][T]\{\psi\} \qquad (5)$$

Diese Gleichung (5) reduziert sich nach Ausführung der Multiplikationen:

$$[S]\{\psi\} + [M]\{\ddot{\psi}\} = \{\Gamma\} - [\mathit{M}]\{\ddot{\psi}\} - [\mathit{C}]\{\dot{\psi}\} - [\mathit{S}]\{\psi\} \qquad (6)$$

$[\mathrm{S}]$ ist die diagonalisierte Matrix der generalisierten Steifigkeiten
$[\mathrm{M}]$ ist die diagonalisierte Matrix der generalisierten Massen
$\{\Gamma\}$ ist der Vektor der generalisierten Kräfte
$[M]$ ist die Matrix der generalisierten hydrodynamischen Massen
$[C]$ ist die Matrix der generalisierten hydrodynamischen Dämpfung
$[S]$ ist die Matrix der generalisierten hydrodynamischen Steifigkeiten.

TRENNUNG DER BEWEGUNGEN UND DURCHBIEGUNGEN

Wenn wellenerregte kritische Körperschwingungen betrachtet werden, genügt es, nur drei "natürliche Koordinaten" in die Berechnung mitzunehmen, d.h. Stampfen (ψ_0), Tauchen (ψ_1) und 2-Knoten Biegung (ψ_2).

Gleichung (6) schreibt sich dann:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{S}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathrm{M}_{00} & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{M}_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{M}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\psi}_0 \\ \ddot{\psi}_1 \\ \ddot{\psi}_2 \end{Bmatrix} =$$

$$= \begin{Bmatrix} \Gamma_0 \\ \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\psi}_0 \\ \ddot{\psi}_1 \\ \ddot{\psi}_2 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\psi}_0 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} S_{00} & S_{01} & S_{02} \\ S_{10} & S_{11} & S_{12} \\ S_{20} & S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Tauchen (ψ_0) und Stampfen (ψ_1) kann jetzt getrennt werden von der Schiffsdurchbiegung (ψ_2):

Tauchen:
$$\mathrm{M}_{00}\ddot{\psi}_0 = \Gamma_0 - M_{00}\ddot{\psi}_0 - M_{01}\ddot{\psi}_1 - M_{02}\ddot{\psi}_2 - C_{00}\dot{\psi}_0 - C_{01}\dot{\psi}_1 - C_{02}\dot{\psi}_2 + {} - S_{00}\psi_0 - S_{01}\psi_1 - S_{02}\psi_2 \quad (8)$$

Stampfen:
$$\mathrm{M}_{11}\ddot{\psi}_1 = \Gamma_1 - M_{10}\ddot{\psi}_0 - M_{11}\ddot{\psi}_1 - M_{12}\ddot{\psi}_2 - C_{10}\dot{\psi}_0 - C_{11}\dot{\psi}_1 - C_{12}\dot{\psi}_2 + {} - S_{10}\psi_0 - S_{11}\psi_1 - S_{12}\psi_2 \quad (9)$$

2 Kn. Durchbiegung:
$$\mathrm{S}_{22}\psi_2 - \mathrm{M}_{22}\ddot{\psi}_2 = \Gamma_2 - M_{20}\ddot{\psi}_0 - M_{21}\ddot{\psi}_1 - M_{22}\ddot{\psi}_2 - C_{20}\dot{\psi}_0 - C_{21}\dot{\psi}_1 + {} - C_{22}\dot{\psi}_2 - S_{20}\psi_0 - S_{21}\psi_1 - S_{22}\psi_2 \quad (10)$$

Eine systematische Ausbreitung nach komplizierteren Durchbiegungsformen ist notwendig für Schiffsfestigkeitsproblemen. Die drei Gleichungen sind jetzt nur gekoppelt durch die hydrodynamischen Beiwerte. Viele von diesen Beiwerten kann man gleich erkennen.

M_{00} = Gesamtmasse vom Schiff (ohne Wasser)
M_{00} = hydrodynamische Masse für Tauchen
Γ_0 = Wellenkraft für Taucherregung
C_{00} = hydrodynamische Dämpfung für Tauchen
M_{11} = mechanisches Massenträgheitsmoment für Stampfen
Γ_1 = Wellenkraft für Stampferregung
C_{11} = hydrodynamische Stampfdämpfung
S_{11} = hydrodynamische Stampfsteifigkeit
S_{22} = generalisierte Biegesteifigkeit von der Schiffskonstruktion
M_{22} = generalisierte, mechanische Schiffsmasse
Γ_2 = Wellenkraft für "Sagging" und "Hogging"
M_{22} = hydrodynamische Masse für 2 Kn.-Schwingung
C_{22} = hydrodynamische Dämpfung für 2 Kn.-Schwingung.

EXPERIMENTELLE LÖSUNG DER SCHWINGUNGSGLEICHUNG

Für die Lösung der Schwingungsgleichung (10), (das heisst die Amplitude ψ_2 zu bestimmen, wenn die Wellenerregung bekannt ist), ist es notwendig, alle Matrixelemente zu bestimmen.

S_{22} und M_{22} sind mechanische Grössen und können berechnet werden durch Energiesätze und Finite-Elemente-Methoden.

Die rechte Seite von Gleichung (10) enthält alle hydrodynamischen Beiwerte, und dieser Bericht beschreibt die experimentelle Bestimmung dieser Beiwerte (Matrixelemente).

a. Messung der generalisierten Wellenkraft Γ_2

Ein spezielles freifahrendes Modell mit unterteilter Elastizität und Masse ermöglicht die Messung der Summe:

$$\Gamma_2 - M_{20}\ddot{\psi}_0 - M_{21}\ddot{\psi}_1 - C_{20}\dot{\psi}_0 - C_{21}\dot{\psi}_1 - S_{20}\psi_0 - S_{21}\psi_1.$$

Diese Summe ist gleich der Wellenkraft Γ_2 korrigiert durch die Wechselwirkung der Schiffsbewegungen ψ_0 und ψ_1 auf die Körperbelastung. Eine vollständige Beschreibung ist gegeben worden in /3/.

Die übrigen Terme von Gleichung (10): M_{22}, C_{22} und S_{22} und die für eine Festigkeitsanalyse notwendigen Beiwerte höherer Ordnung können experimentell bestimmt werden.

b. Experimentelle Bestimmung von hydrodynamischen Beiwerten für elastische Schiffe

Diese zu den Schiffsverformungen gehörenden Beiwerte können mittels eines speziellen segmentierten Oszillators für Vertikalschwingungen gemessen werden. Dieser Oszillator ermöglicht, das Schiff in einer Schwingungsform zu bewegen, so dass die anderen Bewegungs- und Schwingungsformen nicht erregt werden. Durch eine Beschränkung auf 3 Eigenformen (ψ_0, ψ_1 und ψ_2) und 6 Modellsegmente kann die Schwingungsgleichung angenähert gelöst werden. Bild 2 veranschaulicht die Anlage.

Für jedes Segment sind die hydrodynamische Kräfte angegeben in "Schiffskoordinaten". Die harmonischen Vertikalbewegungen der Segmente sind in Übereinstimmung mit der zu untersuchenden Eigenwertfunktion.

Das Signal der Kraftaufnehmer ist gleich der Gesamtkraft des Wassers, und setzt sich zusammen aus 3 Komponenten:

- Beschleunigungsproportional (M) (Masse)
- Geschwindigkeitsproportional (C) (Dämpfung)
- Verdrängungsproportional (S) (Steifigkeit).

Für harmonische Bewegungen gibt es:

$$F_0 = x_0 S_0 + i\omega x_0 C_0 - \omega^2 x_0 M_0$$

oder:
$$F_0 = x_0\,(S_0 + i\omega C_0 - \omega^2 M_0) \qquad (11)$$

Wenn die Oszillatorbewegung eingestellt ist auf ψ_2 (2 Kn. Durchbiegung) gibt es:

$$\left.\begin{aligned} x_0 &= T_{02}\,\psi_2 \\ x_1 &= T_{12}\,\psi_2 \\ x_2 &= T_{22}\,\psi_2 \\ x_3 &= T_{32}\,\psi_2 \\ x_4 &= T_{42}\,\psi_2 \\ x_5 &= T_{52}\,\psi_2 \end{aligned}\right\} \text{-----} \; (12)$$

in Übereinstimmung mit der erwähnten Koordinatentransformation.

Die Kräfte sind dann:

$$\left.\begin{aligned}
F_0 &= T_{02}\,\psi_2\,(S_0 + i\omega C_0 - \omega^2 M_0)\\
F_1 &= T_{12}\,\psi_2\,(S_1 + i\omega C_1 - \omega^2 M_1)\\
&\;\vdots\\
F_5 &= T_{52}\,\psi_2\,(S_5 + i\omega C_5 - \omega^2 M_5)
\end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

oder in Matrixformulierung:

$$\begin{Bmatrix} F_0\\ F_1\\ F_2\\ F_3\\ F_4\\ F_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & S_1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & S_2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_3 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_4 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_5 \end{bmatrix} [T] \begin{Bmatrix} 0\\ 0\\ \psi_2 \end{Bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} C_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_4 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 \end{bmatrix} [T] \begin{Bmatrix} 0\\ 0\\ \psi_2 \end{Bmatrix} +$$

$$- \omega^2 \begin{bmatrix} M_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & M_1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & M_2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & M_3 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_4 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_5 \end{bmatrix} [T] \begin{Bmatrix} 0\\ 0\\ \psi_2 \end{Bmatrix} \qquad (14)$$

mit: $$[T] = \begin{bmatrix} T_{00} & T_{01} & T_{02}\\ T_{10} & T_{11} & T_{12}\\ T_{20} & T_{21} & T_{22}\\ T_{30} & T_{31} & T_{32}\\ T_{40} & T_{41} & T_{42}\\ T_{50} & T_{51} & T_{52} \end{bmatrix}$$

Eigenform 2
Eigenform 1
Eigenform 0

Wenn jetzt die generalisierte Kräfte, d.h. $\{\Gamma\} = [T]^T\{F\}$, eingeführt werden, bekommt man:

$$\begin{Bmatrix} \tilde\Gamma_0\\ \tilde\Gamma_1\\ \tilde\Gamma_2 \end{Bmatrix} = [T]^T[S][T] \begin{Bmatrix} 0\\ 0\\ \psi_2 \end{Bmatrix} + i\omega\,[T]^T[C][T] \begin{Bmatrix} 0\\ 0\\ \psi_2 \end{Bmatrix} - \omega^2\,[T]^T[M][T] \begin{Bmatrix} 0\\ 0\\ \psi_2 \end{Bmatrix} \qquad (15)$$

Nach Multiplikation:

$$\begin{Bmatrix} \tilde\Gamma_0\\ \tilde\Gamma_1\\ \tilde\Gamma_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{00} & S_{01} & S_{02}\\ S_{10} & S_{11} & S_{12}\\ S_{20} & S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0\\ 0\\ \psi_2 \end{Bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02}\\ C_{10} & C_{11} & C_{12}\\ C_{20} & C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0\\ 0\\ \psi_2 \end{Bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02}\\ M_{10} & M_{11} & M_{12}\\ M_{20} & M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0\\ 0\\ \psi_2 \end{Bmatrix} \qquad (16)$$

Die vollständigen Gleichungen lauten:

$$\left.\begin{aligned}\Gamma_0 &= S_{02}\psi_2 + i\omega C_{02}\psi_2 - \omega^2 M_{02}\psi_2\\ \Gamma_1 &= S_{12}\psi_2 + i\omega C_{12}\psi_2 - \omega^2 M_{12}\psi_2\\ \Gamma_2 &= S_{22}\psi_2 + i\omega C_{22}\psi_2 - \omega^2 M_{22}\psi_2\end{aligned}\right\} \quad (17)$$

Durch eine Phasentrennung können die unterschiedlichen Terme der Gleichungen gefunden werden.

Für Γ_2:

$$\left.\begin{aligned}(\Gamma_2)_{0^\circ} &= (S_{22} - \omega^2 M_{22})\psi_2\\ (\Gamma_2)_{90^\circ} &= \omega\, C_{22}\psi_2\end{aligned}\right\} \quad (18)$$

Durch verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Frequenzen können die Gleichungen (18) gelöst werden und die Beiwerte S_{22}, C_{22} und M_{22} bestimmt werden.

Damit sind dann auch die unbekannten Beiwerte von Gleichung (10) gefunden worden.

Auch andere Beiwerte, erwähnt in Gleichung (17), können mittels des segmentierten Oszillators bestimmt werden, und so wird ein rationelles Verfahren für die Lösung des Schiffsfestigkeitsproblems ermöglicht.

MESSGERÄTE FÜR DEN SEGMENTIERTEN OSZILLATOR

In Bild 3 ist die Messanlage angegeben worden. Diese Anlage ermöglicht eine gleichzeitige Umwandlung von "Schiffskoordinaten" in "Eigenformen", und der Ausgang der Anlage gibt unmittelbar die generalisierten Kräfte Γ_0, Γ_1 und Γ_2 von Gleichung (18).

Einstellung der Oszillatorausschläge für unterschiedliche Eigenformen gibt die Möglichkeit, alle Beiwerte von Gleichung (7) zu bestimmen.

SCHLUSSBEMERKUNGEN

1. Für eine geschlossene Lösung des Schiffskörperschwingungsproblems ist eine Koordinatentransformation nach Schwingungsformen sehr geeignet /2/.
2. Für unregelmässige Vorgänge ist diese Transformation notwendig, um die Festigkeitsparameter statistisch zu ergänzen.
3. Schiffsbewegungen und Schiffsdurchbiegungen gehören zu einem System von Gleichungen. Eine gleichzeitige Behandlung ist notwendig.
4. Der segmentierte Schiffsmodelloszillator ist eine mehr-dimensionale Erweiterung des herkömmlichen Modelloszillators von Seegangsversuchsanstalten. Diese Erweiterung ist notwendig für eine geschlossene Lösung des Schiffsdurchbiegungsproblems.

LITERATUR

/1/ Hurty, W.C. und Rubinstein, M.F.: "Dynamics of structures". Prentice Hall, 1964.

/2/ Bishop, R.E.D. und Price, W.G.: "On the relationship between 'Dry Modes' and 'Wet Modes' in the theory of ship response". Journal of Sound and Vibration, 1976, pp. 157-164.

/3/ Wereldsma, R. und Moeyes, G.: "Wave and structural load experiments for elastic ships". 11th Symp. on Naval Hydrodynamics, London, April 1976.

/4/ Wereldsma, R.: "Normal mode approach for ship strength experiments, a proposal". Proceedings of the symposium "The Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves", London, April 1974.

BILDER

Bild 1. Diskrete Näherung für vertikale Schiffsdurchbiegung.

Bild 2. Schematische Angabe des segmentierten Oszillators.

Bild 3. Messgeräte des Oszillators.

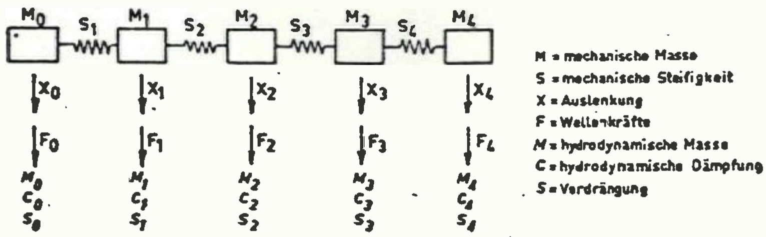

Bild 1. Diskretisierte Näherung der vertikalen Schiffsdurchbiegung.

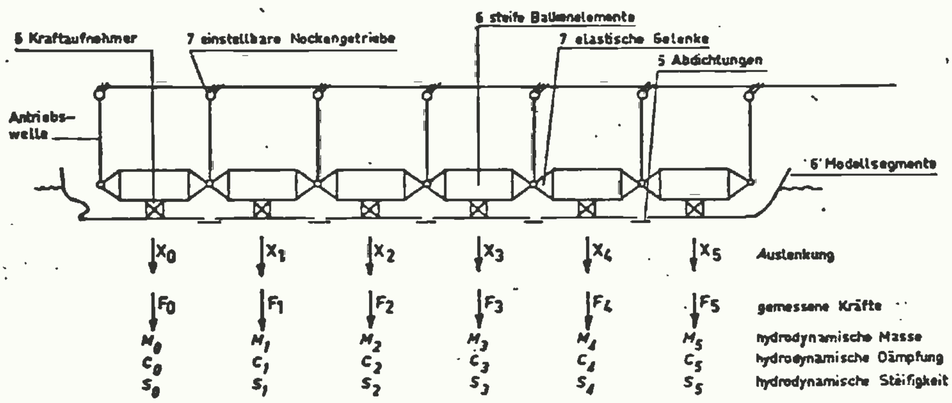

Bild 2. Schematische Angabe des segmentierten Oszillators.

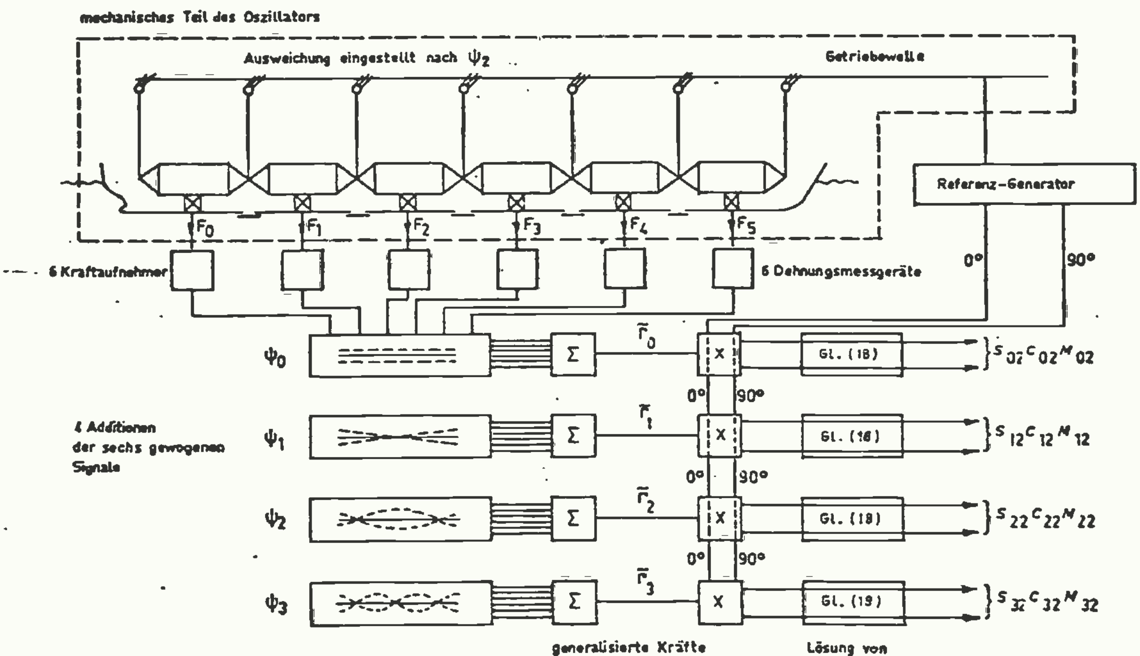

Bild 3. Messgeräte des Oszillators.