

VEB Kombinat Schiffbau
R o s t o c k
Abteilung EEM

F/E-Thema: Untersuchung des Eigen- und Zwangsschwingungsverhaltens von Schiffskonstruktionen

Bericht 1: FEM-Modellierung des Schiffskörpers und der Aufbauten für Schwingungsberechnungen

Name und Anschrift
der F/E-Stelle:

VEB Kombinat Schiffbau
- Stammbetrieb -
Direktorat E
2500 Rostock 1
Doberaner Str. 110/111

Für die Gesamtarbeit
verantwortlicher wiss.-
techn. Bearbeiter:

Dr. Schmitz

Verantwortliche
Bearbeiter:

Dr. Geßner
Dr. Schmitz

Beginn der Arbeit:

5/83

Abschluß der Arbeit:

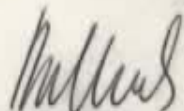
4/84

Der Bericht besteht aus:

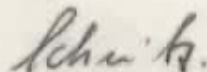
30 Seiten

Anzahl der angefertigten
Exemplare:

Nummer dieses Exemplares:



Dr. Dallach
Hauptabteilungsleiter EE



Dr. Schmitz
Verantw. wiss.-techn.
Bearbeiter

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Berechnungsprogramm PASSAD	2
1.1. Elementtypen	2
1.2. Vergleich der Scheibeneigenschaften, Typ 3/ Typ 6	4
1.3. Programmabarbeitung	7
2. Idealisierung versteifter und gesickter Flächentragwerke	8
2.1. Versteifte Flächentragwerke	11
2.2. Gesickte Flächentragwerke	12
2.3. Behandlung exzentrisch angeordneter Steifen als Balkenelemente	14
3. Schiffskörper	15
3.1. Bordwände	15
3.2. Doppelboden	16
3.3. Ladungsdecks	19
4. Aufbauten	21
4.1. Ebene Modelle	21
4.2. Räumliche Modelle	22
4.3. Netzteilung und Freiheitsgrade	22
4.4. Berechnung der Aufbautenschwingungen	23
4.4.1. Entkoppelte Berechnung des Aufbaus	23
4.4.2. Heck-/Aufbautenschwingungen	23
5. Massenverteilung	24
5.1. Schiffsmasse und Zuladung	24
5.2. Hydrodynamische Masse	25
6. Zwangsschwingungsberechnung	25
6.1. Dämpfung	25
6.2. Erregergrößen	26
7. Durchführung der Berechnungen	28
Literatur	30

1. Berechnungsprogramm PASSAD

1.1. Elementtypen

Im DDR-Schiffbau steht das finite Elemente-Programm PASSAD für die statische und dynamische Berechnung linearer Tragwerkssysteme zur Verfügung. Für die Modellierung des Schiffskörpers und der Aufbauten werden die folgenden 5 der insgesamt 10 in der Programmbibliothek enthaltenen Elementtypen verwendet:

- Typ 1 räumliches Fachwerkelement
- Typ 2 räumliches Balkenelement
- Typ 3 Element für den ebenen Spannungs- und Verzerrungszustand einer Scheibe
- Typ 6 dünnes Platten- oder Schalenelement
- Typ 7 Federelement

Typ 2

Das prismatische Balkenelement berücksichtigt Torsion, zweiachsige Biegung sowie Längs- und Schubverformungen. Die Berücksichtigung exentrischer Anordnung bei einseitiger Versteifung von Flächentragwerken ist im Programm nicht vorgesehen.

Typ 3

Es ist ein Vierecks- (und Dreiecks-) Element von beliebiger Dicke (Bild 19), das in einer beliebigen Ebene bezüglich des räumlichen Koordinatensystems angeordnet werden kann. Orthotrope Elastizitätseigenschaften können berücksichtigt werden. Das Element beruht auf einer isoparametrischen Formulierung. Das bedeutet, daß ein Element mit linearen Berandungen und vorgegebener Knotenzahl in ein Element mit gekrümmten Rändern der gleichen Knotenzahl abgebildet wird. Für die Koordinatendarstellung und die Beschreibung des Deformationszustandes werden also die gleichen Interpolationsfunktionen gewählt.

Kompatible Elementfunktionen garantieren bei feiner werdender Netzteilung monotone Konvergenz gegen die gesuchte Lösung.

Wird das Scheibenelement zur Modellierung auf Biegung beanspruchter Stege eingesetzt (z.B. Bordwand des Schiffskörpers bei Vertikalschwingungen), ist es zur Verbesserung des Biegeverhaltens möglich, unverträgliche Verschiebungsansätze zu aktivieren. Der Grundgedanke solcher inkompatiblen Verschiebungsansätze ist es, daß zum ursprünglich linearen Verschiebungsfeld eine nicht lineare Komponente hinzugefügt wird. Für ein Rechteckelement ist auf diese Weise die Beschreibung eines konstanten Biegemomentes möglich, und es ergibt sich ein besseres Verhalten bei Spannungsanalysen. Nachteil der inkompatiblen Verschiebungsansätze ist es, daß die monotone Konvergenz nicht mehr gesichert ist.

Typ 6

Die Elemente mit vier oder drei Knoten können beliebig im Raum liegen. Es sind orthotrope Materialkonstanten zulässig. Die Materialkonstanten können für den Membran- und Biegezustand getrennt eingegeben werden.

Bei einer Berechnung von Platten ist eine Steifigkeit gegenüber der Drehung um die Plattennormale nicht definiert. In gekrümmten Flächentragwerken muß die Drehung um die Flächennormale als ein zusätzlicher Freiheitsgrad zugelassen werden und durch ein Federlement mit einer kleinen Federsteifigkeit in Richtung der Drehung um die Schalennormale ersetzt werden (Steifigkeit etwa 10 % der Elementbiegesteifigkeit). Elemente mit vier Knoten werden in vier verträgliche Dreiecke eingeteilt, wobei der zentrale Knoten auf den gemittelten Koordinaten der vier Eckpunkte liegt. Die entsprechenden Anteile der Steifigkeitsmatrizen der vier Dreiecke werden aufsummiert.

Für die Scheibensteifigkeit wird ein linearer Verschiebungsansatz (konstante Verzerrungen) verwendet.

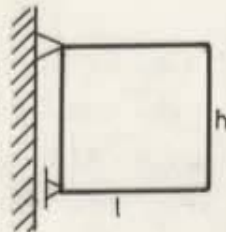
Für die Bestimmung der Biegesteifigkeitsmatrix der Schalenelemente werden ICCT 9 - Elemente (Linear Curvature

Compatible Triangle) mit 9 Freiheitsgraden verwendet. Jeder Knoten des Dreiecks hat ein Verschiebungs- und zwei Verdrehfreiheitsgrade. Für die Verschiebung wird ein kubischer Polynomansatz verwendet.

1.2. Vergleich der Scheibeneigenschaften, Typ 3/Typ 6

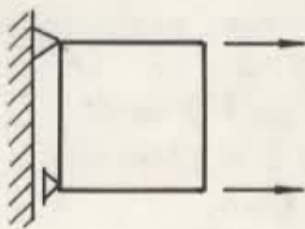
Da beide Elemente zur Modellierung von Scheibenstrukturen geeignet sind, ist es für den Anwender von Interesse, die Elementeigenschaften vergleichen zu können. Dazu wurde der Robinsontest /1/ verwendet.

Ausgangspunkt des Versuches ist ein einseitig gelagertes rechteckiges Element, bei dem im Verlauf der Untersuchungen das Seitenverhältnis zwischen $l/1$ und $l/10$ variiert.

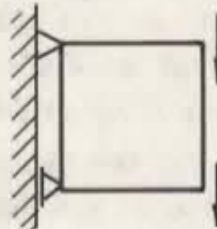


$$\begin{aligned} h &= 100 \text{ mm} \\ b &= 5 \text{ mm (Dicke)} \\ E &= 2,06 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \\ G &= 7,92 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2 \\ T &= 10 \text{ N} \end{aligned}$$

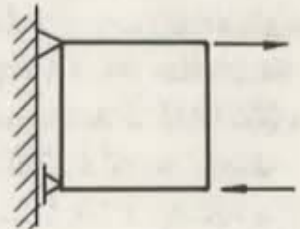
Des weiteren wird dieses Element (in den verschiedenen Längen) mehreren Testlastfällen unterworfen, die den typischen Belastungen eines Kragbalkens entsprechen.



Lastfall M1
Zug/Druck



Lastfall M2
Biegung und
Querkraft



Lastfall M3
reine Biegung =
Endmoment

Verglichen werden die Elemente

Typ 3 mit verträglichen Verschiebungsansätzen (ICODE = 1)

Typ 3 mit unverträglichen (ICODE = 0)

Typ 6 mit Schubverformung mit Schubverformung.

mit den Ergebnissen der Balkentheorie mit Schubeinfluß.

Die Vergleichslösungen der Balkentheorie sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Belastungsart	Formel	l/h -	maximale Verschiebung in mm				
			1	2	3	5	10
M 1	$\delta = \frac{F \cdot l}{E \cdot A}$		$1,942 \cdot 10^{-5}$	$3883 \cdot 10^{-5}$	$5,825 \cdot 10^{-5}$	$9,709 \cdot 10^{-5}$	$19,417 \cdot 10^{-5}$
M 2	$\delta = \frac{Fl^3}{3EJ} + \frac{3Fl}{2GA}$		$1,534 \cdot 10^{-4}$	$7,729 \cdot 10^{-4}$	$23,24 \cdot 10^{-4}$	$100,88 \cdot 10^{-4}$	$784,2 \cdot 10^{-4}$
M 3	$\delta = \frac{Fl^2 h}{2EJ}$		$5,825 \cdot 10^{-5}$	$23,3 \cdot 10^{-5}$	$52,43 \cdot 10^{-5}$	$145,63 \cdot 10^{-5}$	$582,52 \cdot 10^{-5}$

Dabei muß darauf hingewiesen werden, daß diese Vergleichslösung kein exaktes Ergebnis darstellt und mit dem Fehler der Balkentheorie behaftet ist.

Für den Lastfall Zug/Druck ergibt sich erwartungsgemäß eine exakte Übereinstimmung aller Elemente mit dem Stab.

Bei den Lastfällen Biegung und Querkraft (M2) und reiner Biegung (M3) versagen das Schalenelement und das Scheibenelement mit zunehmendem Längen-Höhen-Verhältnis l/h. (Bild 1) Durch Verwendung der inkompatiblen Verschiebungsansätze werden die Eigenschaften des Scheibenelementes dagegen erheblich verbessert. So liefert dieses Scheibenelement unter dem Testlastfall M3 die exakte Lösung, während sich beim Lastfall M2 ein Fehler von 25 % unabhängig von l/h ergibt. Die Ursachen für die unterschiedlichen Ergebnisse bei den einzelnen Elementtypen liegen vor allen Dingen in dem verwendeten Verschiebungsansätzen.

Aus den Ergebnissen werden die Vorteile des Scheibenelementes gegenüber dem Schalenelement ersichtlich. Mit dem Schalenelement wird die Struktur zu steif idealisiert. Das Scheibenelement mit inkompatiblen Verschiebungsansätzen erfüllt die Forderungen an Konvergenz und Genauigkeit bei der Beschreibung des Biegeverhaltens am besten.

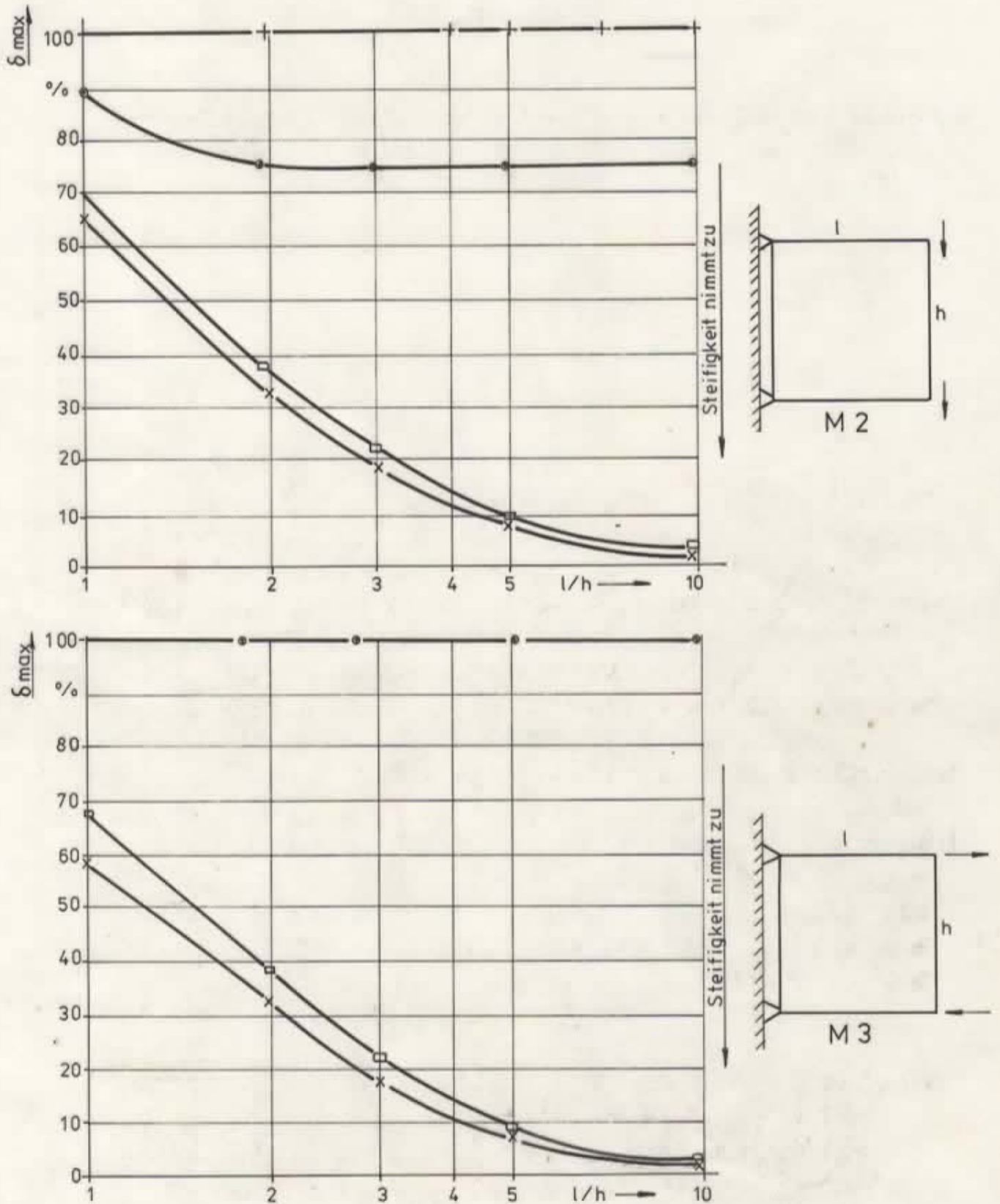


Bild 1: Genauigkeit in % der max. Verschiebung

- + Balken
- Scheibenelement mit inkompatiblen Verschiebungsansätzen
- Scheibenelement
- x Schalenelement

Für die Idealisierung von Scheibenkonstruktionen ist es deshalb zu empfehlen, das Scheibenelement gegenüber dem Schalenelement zu bevorzugen, sofern zur Beschreibung des Deformationszustandes die Freiheitsgrade des ebenen Spannungszustandes ausreichen, Plattenfreiheitsgrade also nicht erforderlich sind.

1.3. Programmabarbeitung

Finite-Elemente-Berechnungen größerer Systeme erfordern einen erheblichen Aufwand für Datenerstellung, Kontrolle und Auswertung der Rechenergebnisse. Im Programm sind Möglichkeiten zur Datengenerierung, -kontrolle und grafischen Darstellung enthalten. Dabei wurden bestehende Universalprogramme problemorientiert modifiziert und zu einem System gekoppelt. Bild 2 zeigt den Datenflußplan zu dem Programmsystem für Schwingungsberechnung.

Für die Durchführung der Rechnungen steht ein Rechner (R 40) mit folgender Hardwarekonfiguration zur Verfügung:

- Kernspeicher mit 200 - 350 K Byte für die Programme
- Magnetbandgeräte
- Wechselplattenspeicher
- Lochkartenleser
- Drucker
- Lochstreifenstanzer
- Zeichenmaschine
- graphischer Bildschirm

In der ersten Abarbeitungsstufe erfolgt eine Generierung und Prüfung der Daten durch das Programm PASSAD. Eine weitere Kontrolle der Daten kann durch das Zeichnen der Netzstruktur vom FE-Modell erfolgen. Da oft verschiedene Elementlinien zusammenfallen (z.B. Balken, Plattenelement), können die Elementtypen durch die Auswahlmöglichkeit im Programm PASFGU getrennt gezeichnet werden.

Mit den geprüften Daten können in der zweiten Abarbeitungsstufe die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen mit

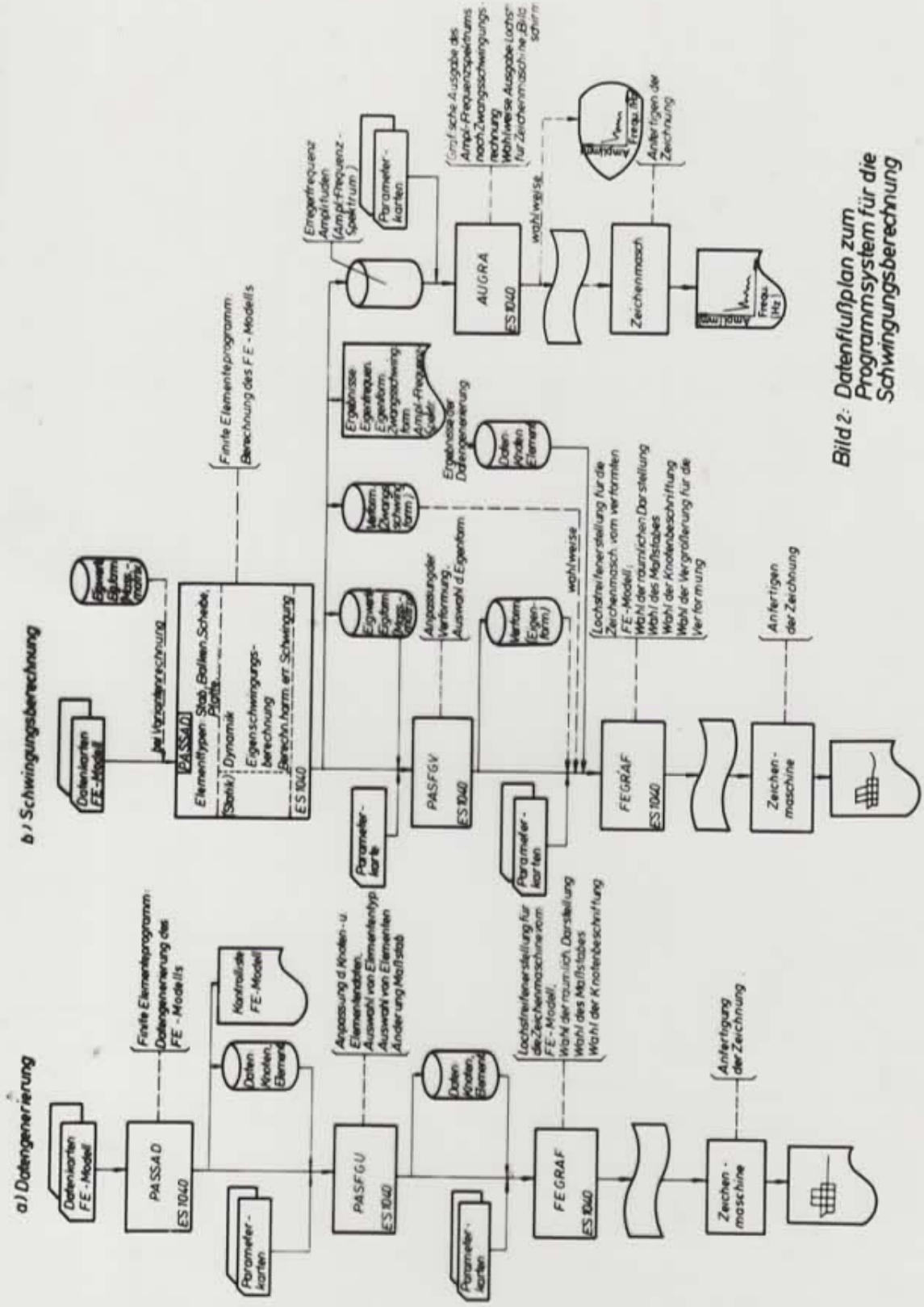


Bild 2: Datenflußplan zum Programmsystem für die Schwingungsberechnung

dem Programm PASSAD berechnet werden.

Um das Programm PASSAD auf Systeme ohne Stützbedingungen, wie es der Schiffskörper darstellt, anwenden zu können, erfolgt eine Transformation der Steifigkeitsmatrix /2/. Wegen der hohen Rechenzeiten bei großen FE-Modellen ist im Programm ein Prüfpunkt/Wiederanlauf vorhanden, dadurch ist nach einem Programmabbruch ein Wiederanlauf möglich.

Die Rechenergebnisse (Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen, Gesamtmassenmatrix) werden auf maschinenlesbaren Datenträgern gespeichert. Zu einem beliebigen Zeitpunkt können mit den gespeicherten Ergebnissen verschiedene Varianten der Zwangsschwingungsberechnungen durchgeführt werden. Weiterhin ist es möglich, zur Einsparung von Rechenzeit bei der Berechnung modifizierter Beispiele schon berechnete Eigenschwingungsformen für eine neue Eigenschwingungsberechnung als Anfangsvektoren zu benutzen.

Eigen- oder Zwangsschwingungsformen können mit der Zeichenmaschine dargestellt werden. Ebenso kann das Amplituden-Frequenz-Spektrum von ausgewählten Knoten des FE-Modells mit der Zeichenmaschine oder auf einem Bildschirm wiedergegeben werden.

2. Idealisierung versteifter und gesickter Flächentragwerke

Bei der Idealisierung größerer versteifter oder gesickter Flächentragwerke ist es nicht möglich, durch feine Netzteilung die Plattenfelder, Versteifungen bzw. Sicken einzeln zu modellieren. Das trifft besonders dann zu, wenn globale Schwingungen des Schiffskörpers und der Aufbauten berechnet werden sollen. Es müssen dann größere versteifte Flächentragwerke durch ein Schalen- bzw. Scheibenelement idealisiert werden. Die konstruktiv bedingte Orthotropie muß in diesem Falle näherungsweise durch eine Materialorthotropie ersetzt werden, wobei die Koeffizienten der Elastizitätsmatrix so bestimmt werden, daß die Steifigkeiten der realen Konstruktion den einer ebenen Platte bzw. Scheibe gleicher Dicke entsprechen. Bei Biegebeanspruchung muß das Schalen-

element (Typ 6) bei Scheibenbeanspruchung können das Scheibenelement (Typ 3) oder Typ 6 Verwendung finden. Spielen Platten- und Scheibenbeanspruchungen eine Rolle, muß Typ 6 angewendet werden. Da die konstruktionsbedingte Orthotropie auf unterschiedliche Elastizitätsmatrizen für Platten- und Scheibenverformungen führt, sind zwei Elastizitätsmatrizen einzugeben. Diese getrennte Betrachtungsweise stellt eine Näherung dar.

Im Programm PASSAD ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Elastizitätsmatrizen vorgesehen.

Die Elastizitätsmatrix muß elementweise eingegeben werden:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & 0 \\ C_{xy} & C_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Bei Verwendung von Scheibenelementen für den ebenen Spannungszustand (Typ 3) werden die richtungsabhängigen E-Moduln und Querkontraktionszahlen eingegeben.

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} E_n &= E_x = (1 - \nu^2) C_{xx} & G_{ns} &= G_{xy} \\ E_s &= E_y = (1 - \nu^2) C_{yy} & \nu_{ns} &= \nu \end{aligned}$$

(2)

$$\left. \begin{aligned} E_c &= E \\ \nu_{nt} &= \nu_{st} = \nu \end{aligned} \right\} \text{ ohne Bedeutung für} \\ \text{ebenen Spannungszustand}$$

Bei der Bestimmung der orthotropen Elastizitätsmatrix der versteiften bzw. gesickten Platte wird die orthotrope Plattentheorie zugrunde gelegt. Es muß darauf hingewiesen werden, daß eine real versteifte Platte bzw. Sickenkonstruktion nicht in allen Beziehungen mit der äquivalenten orthotropen Platte übereinstimmen kann.

2.1. Versteifte Flächentragwerke

Bei den angegebenen Beziehungen für die Koeffizienten der Elastizitätsmatrix /2/ müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Das Verhältnis von Steifenabstand zur Seitenlänge muß genügend klein sein, um eine homogene Steifigkeitsverteilung voraussetzen zu können. Dabei sollte der Steifenabstand nicht größer als die mittragende Plattenbreite sein.
- Die Biege- und Torsionssteifigkeit hängt nicht von den Randbedingungen ab
- Die Steifen sind gleichmäßig verteilt

Plattenverformung

$$C_{xx} = E \left\{ \frac{1}{1-\nu^2} + \frac{12e_x^2}{t^2(1-\nu^2)} + \frac{12I_x}{t^3 s_x} \right\}$$
$$C_{yy} = E \left\{ \frac{1}{1-\nu^2} + \frac{12e_y^2}{t^2(1-\nu^2)} + \frac{12I_y}{t^3 s_y} \right\} \quad (3)$$

$$C_{xy} = \frac{\nu E}{1-\nu^2}$$

$$G_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left\{ 1 + \frac{3}{t^3} \left(\frac{\sum d_{ix} t_{ix}^3}{3 s_x} + \frac{\sum d_{iy} t_{iy}^3}{3 s_y} \right) \right\}$$

Der Index x bzw. y bezieht sich auf die in x- bzw. y-Richtung verlaufende Versteifung.

In (3) bedeuten

t Plattendicke

I_x, I_y Flächenträgheitsmoment der Steife bezogen auf die neutrale Ebene, die durch den gemeinsamen Schwerpunkt von Platte und Steife verläuft

s_x, s_y Steifenabstand
 e_x, e_y Abstand Mitte Deckplatte - neutrale Ebene

Kann bei großem Steifenabstand nicht mehr der volle Steifenabstand als mittragende Plattenbreite vorausgesetzt werden, ist die Einführung von Korrekturfaktoren erforderlich /2/.

Scheibenverformungen

Die Berücksichtigung der Versteifungen erfolgt durch Verschmieren über einen äquivalenten Elastizitätsmodul. Es ergeben sich dann keine Schwierigkeiten bei der Festlegung der Blechdicke und die Elastizitätsmatrizen für Platten- und Scheibenbeanspruchung können unabhängig voneinander verändert werden.

$$C_{xx} = \left(1 + \frac{A_x}{t s_x} \right) \frac{E}{(1-\nu^2)}$$

$$C_{yy} = \left(1 + \frac{A_y}{t s_y} \right) \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (4)$$

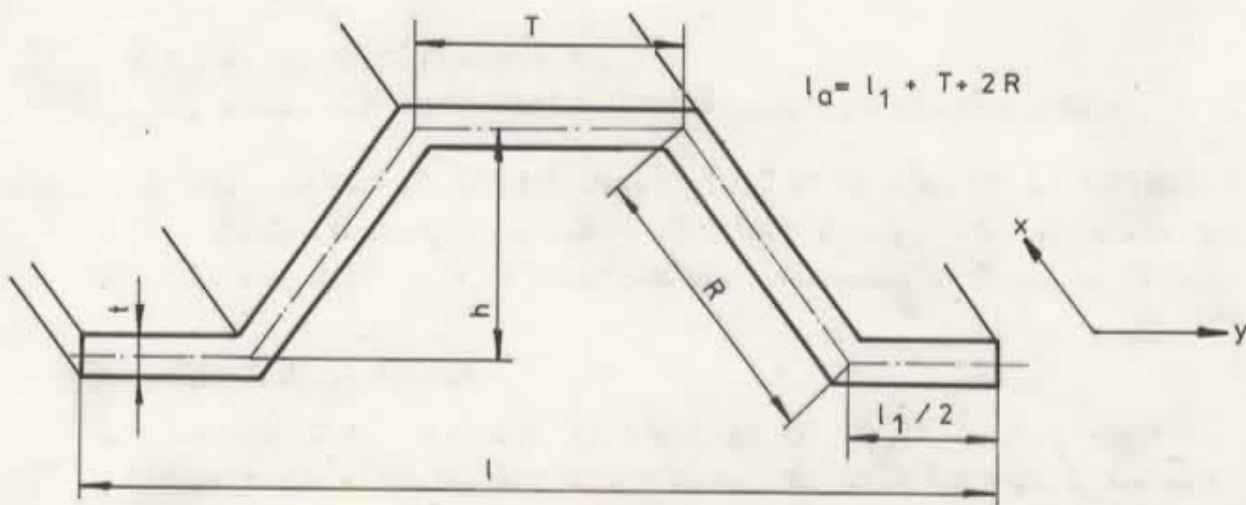
$$C_{xy} = \frac{\nu E}{1-\nu^2}$$

$$G_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

A_x, A_y Querschnittsfläche der Steife

2.2. Gesickte Flächentragwerke

Für eine gesickte Konstruktion entsprechend unten stehender Skizze lassen sich die Koeffizienten der Elastizitätsmatrizen nach den folgenden Beziehungen näherungsweise berechnen /3/:



Plattenverformung

$$C_{xx} = \frac{12}{t^3} \frac{EI_x}{l}$$

$$C_{yy} = \frac{l}{I_a} E$$

(5)

$$C_{xy} = \nu \frac{l}{I_a} E$$

$$G_{xy} = \frac{I_a E}{2l(1+\nu)}$$

I_x Flächenträgheitsmoment eines Sickenstreifens
der Breite 1

Scheibenverformung

$$C_{xx} = E \frac{I_a}{l}$$

$$C_{yy} = \frac{E I t^2}{4 h^2 (2R + 3T)} \quad (6)$$

$$C_{xy} = \nu C_{yy}$$

$$G_{xy} = G \frac{l}{I_a}$$

In Tabelle 1 sind die Koeffizienten für einige im Schiffbau üblichen Trapezsicken mit unterschiedlichen Blechdicken und Seitenabstand zusammengestellt worden.

2.3. Behandlung exzentrisch angeordneter Steifen als Balkenelemente

Es wird empfohlen, für das Flächenträgheitsmoment des exzentrisch an einer Platte angeordneten Balkens das Flächenträgheitsmoment des Profils einschließlich der mittragenden Platte zu verwenden. Der dabei entstehende Fehler durch doppelte Berücksichtigung des Eigenträgheitsmomentes der Platte ist vernachlässigbar. Für die Querschnittsfläche ist nur die Profilfläche einzusetzen.

Sicken verlaufen in x-Richtung der Platte



S60 h = 60mm
S100 h = 100mm

Sicke 60		Plattenverformungen				Scheibenverformungen			
(mm)	(mm)	C_{xx}	C_{yy}	C_{xy}	G_{xy}	C_{xx}	C_{yy}	C_{xy}	G_{xy}
4	600	$4,41 \cdot 10^2$	0,897	0,269	0,429	1,115	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$4,56 \cdot 10^{-4}$	0,345
	800	$3,61 \cdot 10^2$	0,920	0,276	0,418	1,0865	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$6,08 \cdot 10^{-4}$	0,345
5	600	$2,83 \cdot 10^2$	0,897	0,269	0,429	1,115	$2,38 \cdot 10^{-3}$	$7,13 \cdot 10^{-4}$	0,345
	800	$2,32 \cdot 10^2$	0,92	0,276	0,418	1,087	$3,17 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	0,354
6	600	$1,94 \cdot 10^2$	0,897	0,269	0,429	1,115	$3,42 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	0,345
	800	$1,60 \cdot 10^2$	0,92	0,276	0,418	1,087	$4,56 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	0,354
7	600	$1,42 \cdot 10^2$	0,897	0,269	0,429	1,115	$4,66 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,345
	800	$1,16 \cdot 10^2$	0,92	0,276	0,418	1,087	$6,21 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	0,354
8	600	$1,09 \cdot 10^2$	0,897	0,269	0,429	1,115	$6,08 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	0,345
	800	89,06	0,92	0,276	0,418	1,087	$8,11 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-2}$	0,354

Sicke 100

5	600	$8,54 \cdot 10^2$	0,839	0,252	0,459	1,193	$706 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-4}$	0,323
	800	$7,22 \cdot 10^2$	0,874	0,262	0,44	1,144	$9,42 \cdot 10^{-4}$	$2,82 \cdot 10^{-4}$	0,336
6	600	$5,93 \cdot 10^2$	0,839	0,252	0,459	1,193	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$3,05 \cdot 10^{-4}$	0,323
	800	$5,01 \cdot 10^2$	0,874	0,262	0,44	1,144	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$4,07 \cdot 10^{-4}$	0,336
7	600	$4,34 \cdot 10^2$	0,839	0,252	0,459	1,193	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$4,15 \cdot 10^{-4}$	0,323
	800	$3,67 \cdot 10^2$	0,874	0,262	0,44	1,144	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$5,54 \cdot 10^{-4}$	0,336
8	600	$3,31 \cdot 10^2$	0,839	0,252	0,459	1,193	$1,81 \cdot 10^{-3}$	$5,42 \cdot 10^{-4}$	0,323
	800	$2,8 \cdot 10^2$	0,874	0,262	0,44	1,144	$2,41 \cdot 10^{-3}$	$7,23 \cdot 10^{-4}$	0,336
9	600	$2,61 \cdot 10^2$	0,839	0,252	0,459	1,193	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$6,86 \cdot 10^{-4}$	0,323
	800	$2,2 \cdot 10^2$	0,874	0,262	0,44	1,144	$3,05 \cdot 10^{-3}$	$9,15 \cdot 10^{-4}$	0,336
10	600	$2,11 \cdot 10^2$	0,839	0,252	0,459	1,193	$2,82 \cdot 10^{-3}$	$8,47 \cdot 10^{-4}$	0,323
	800	$1,78 \cdot 10^2$	0,874	0,262	0,44	1,144	$3,77 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	0,336

Tabelle 1: Koeffizienten der Elastizitätsmatrizen für Platten- und Scheibenverformung

$$C_{ik} = \bar{C}_{ik} E, \quad G_{xy} = \bar{G}_{xy} E$$

3. Schiffskörper

Schiffskörperschwingungen in den unteren Schwingungsgraden, wie sie durch freie Massenmomente 1. und 2. Ordnung langsamlaufender Hauptmotoren angeregt werden, können mit dem Balkenmodell mit ausreichender Genauigkeit vorausberechnet werden. Das gilt mit Sicherheit bis zum III. Schwingungsgrad. Mit zunehmender Schwingfrequenz bewirkt die Kopplung mit größeren Teilstrukturen (Doppelboden, Ladungsdecks, Aufbauten) größere Abweichungen zur Balkentheorie, die vom Schiffstyp abhängen. Im Frequenzbereich der Propellererregung treten keine ausgeprägten Balkenschwingungen des Schiffskörpers mehr auf, und es sind Berechnungsmodelle erforderlich, die diesen Kopplungseinfluß berücksichtigen. Wegen der universellen Anwendbarkeit auf die verschiedensten Schiffstypen und Anpassungsfähigkeit an die unterschiedlichsten Berechnungsaufgaben hat sich die FE-Methode in den letzten Jahren vielfach bewährt. Als Grundmodell für die Berechnung der propellererregten Schiffskörperschwingungen wird von einem Kastenträger für den Schiffsrumpf ausgegangen. Nachfolgend werden Hinweise zur Modellierung der Teilstrukturen gegeben.

3.1. Bordwände

Elementtypen

Für die Modellierung der Bordwand ist dem Scheibenelement Typ 3 mit unverträglichen Verschiebungsansätzen der Vorzug zu geben, da es auf Grund der besseren Ansatzfunktionen die genauesten Ergebnisse für den Steg des Kastenträgers liefert.

Zur Berücksichtigung der drehelastischen Einspannung von Ladungsdecks und Doppelboden an der Bordwand können in Spantrichtung verlaufende Balken eingesetzt werden.

Bei Verwendung von Schalenelementen Typ 6 anstelle der Scheiben und Balken besteht die Gefahr einer zu steifen Modellierung des Kastenträgers, besonders in Verbindung mit ungünstigen Seitenverhältnissen der Elemente.

Netzteilung

Die Anzahl der Schnitte in Schiffslängsrichtung ist dem Verformungszustand in dem zu untersuchenden Frequenzbereich anzupassen. Ausreichend genaue Ergebnisse sind nur zu erhalten, wenn 2 Modellknoten zwischen den zu erwarteten Schwingungsknoten liegen /5/. Durchgeführte Vergleichsberechnungen am Kastenträger zeigen, daß die Aufteilung des Schiffskörpers in 15 bis 20 Abschnitte in der Regel ausreichend ist.

Über die Seitenhöhe kommt man mit 2 Scheibenelementen aus. Eine zusätzliche Teilung über die Höhe bringt keine wesentliche Steigerung der Genauigkeit, da auf diese Weise die Approximation des Verformungszustandes bei Schiffskörperschwingungen kaum verbessert wird.

Freiheitsgrade

In der Bordwand können die Verschiebungen in Querrichtung behindert werden. Die dadurch an den Anschlüssen von Boden und Decks bewirkte Behinderung der Querkontraktion führt zu einer vernachlässigbaren Versteifung, die mit zunehmendem Schwingungsgrad auch noch abnimmt. Dieses wurde an einem prismatischen und einem schiffskörperähnlichen Kastenträger überprüft. Ausnahmen bilden Knoten der Außenhaut, die an querverlaufende Scheibenkonstruktionen anschließen, deren Vertikalverformungen von Interesse sind und die von beiden Scheibefreiheitsgraden abhängig sind. Dieses ist zu beachten, wenn der Doppelboden als räumliches Scheibenmodell idealisiert wird (s. Abschnitt 3.2).

3.2. Doppelboden

Die Modellierung des Doppelbodens ist davon abhängig, ob lediglich die Querschwingungen des Doppelbodens oder die globalen Schwingungen in Kopplung mit dem Doppelboden berechnet werden sollen.

Feines Scheibenmodell

Vollständige Erfassung von Innen- und Außenboden, Bodenwrangen, Längsträgern durch ein räumliches Scheibenmodell (Element Typ 3)

- Gurtwirkung im Schiffsrumpf und vertikale Verformung des Doppelbodens werden automatisch erfaßt
- Hohe Berechnungsgenauigkeit wird durch große Anzahl von Freiheitsgraden und aufwendige Dateneingabe erkauft, deshalb praktisch nur für entkoppelte Berechnung der Doppelbodenquerschwingungen geeignet.

Grobes Scheibenmodell

Zusammenfassung mehrerer Bodenwrangen und Längsträger zu dicken Scheibenelementen, wobei Innen- und Außenboden und damit die räumliche Struktur erhalten bleiben (Element Typ 3)

- Erfassung der Gurtwirkung ähnlich wie beim feinen Scheibenmodell, Approximation der Vertikalverformung des Doppelbodens schlechter
- Bei 3 - 4 Elementen über die halbe Schiffsbreite und 15 - 20 Elementen über die Schiffslänge ist eine Berechnung der gekoppelten Schiffskörper-/Doppelbodenschwingungen mit vertretbarem Aufwand möglich.

Orthotrope Platte

Ersatz der räumlichen Doppelbodenkonstruktion durch orthotrope Schalenelemente auf halber Doppelbodenhöhe (Element Typ 6), Berechnung der orthotropen Plattensteifigkeiten nach Schade /6/ und Berechnung der Elastizitätsmatrix für die Biegeverformung des Elements Typ 6

$$\begin{aligned} C_{xx} &= \frac{12 D_x}{t^3} & C_{yy} &= \frac{12 D_y}{t^3} \\ C_{xy} &= \frac{\nu E}{(1 - \nu^2)} & G_{xy} &= \frac{12 D_{xy}}{t^3} \end{aligned} \quad (7)$$

(Programm für Tischrechner K 1003 im KBR vorhanden)

- Wegen Vernachlässigung der Schubabsenkung von Bodenwrangen und Längsträgern wird Doppelbodenkonstruktion zu steif modelliert
- Für hohe Doppelbodenhöhen nicht und für niedrige nur als grobe Näherung zur Erfassung der Koppelwirkung bei globalen Schiffskörperschwingungen geeignet, dafür zusätzliche Eingabe der Elastizitätsmatrix für Scheibendeformation (Gurtwirkung) analog Gleichung (4) erforderlich.
- Einsparung einer horizontalen Netzebene und damit geringere Anzahl von Knoten, Elementen und Freiheitsgraden gegenüber grobem Scheibenmodell wird mit Genauigkeitsverlust erkauft.

Trägerrost-/Scheibenmodell

Reduktion des Doppelbodens auf einem Trägerrost (Element Typ 2) verknüpft mit einer ebenen Scheibenkonstruktion (Element Typ 3) auf halber Doppelbodenhöhe

- Berücksichtigung der Gurtwirkung von Innen- und Außenboden für den Schiffskörper über Scheibenelemente, die der übrigen Längsverbände über die Querschnittsfläche der Balken
- Berücksichtigung der örtlichen Steifigkeit über Biege-, Torsionsträgheitsmoment und Schubfläche der Balkenelemente
- Bei Modellierung jeder einzelnen Bodenwrange wegen der Anzahl der Freiheitsgrade nur für örtliche Schwingungen des Doppelbodens geeignet. Dabei können Scheibenelemente entfallen
- Verwendung für gekoppelte Schiffskörper-/Doppelbodenschwingungen erfordert Zusammenfassung mehrerer Querverbände
- Vorteile gegenüber räumlichen Scheibenmodellen wegen Einsparung einer horizontalen Netzebene und damit geringere Anzahl von Knoten, Elementen und Freiheitsgraden bei vergleichbarer Genauigkeit.

Freiheitsgrade

Werden Scheibenmodelle verwendet, müssen für lokale und globale Untersuchungen alle Verschiebungsfreiheitsgrade zugelassen werden. Die Drehfreiheitsgrade werden behindert. Eine Behinderung der Querfreiheitsgrade würde zu einer unzulässigen Versteifung der Doppelbodenkonstruktion führen.

Bei der Modellierung als orthotrope Platte oder Trägerrost/Scheibe können die Querverschiebungen und die Drehungen um die Hochachse und bei örtlichen Schwingungen zusätzlich die Längsverschiebungen behindert werden.

Symmetrie- bzw. Antimetriebedingungen werden über die Freiheitsgrade der Knoten in den Symmetrieschnitten gesichert.

Bei der Berücksichtigung der hydrodynamischen Massen ist die Möglichkeit des Programms, für die Freiheitsgrade unterschiedliche Trägheitsgrößen einzugeben, auszunutzen.

3.3. Ladungsdecks

Für Schiffe mit Luken werden die Ladungsdecks lediglich als Gurte für den Schiffskörper berücksichtigt. Die örtlichen Schwingungen sind in der Regel nicht von Interesse. Große ununterstützte Decksflächen mit hoher Massebelegung haben Einfluß auf die globalen Schiffsschwingungen im höheren Frequenzbereich und sind selbst schwingungsgefährdet. Je nach Berechnungsaufgabe und konstruktiver Gestaltung sind folgende Modelle geeignet:

Scheibenmodell mit Fachwerkstäben

Erfassung der Deckbeplattung durch Scheibenelemente (Typ 3) und der Längsversteifungen durch Fachwerkstäbe (Typ 1)

- Modell erfaßt nur Gurtwirkung des Decks für Schiffskörper
- Anwendbar, wenn Querschwingungen des Decks ohne Bedeutung

Orthotrope Platte mit Einzelbalken

Verwendung orthotroper Schalenelemente (Typ 6) und Balkenelemente (Typ 2)

- Berücksichtigung der Gurtwirkung der Decksbeplattung und kleiner Längsversteifungen (Normprofile) über die orthotrope Scheibensteifigkeit, die der Unterzüge über Querschnittsfläche der Balken
- Erfassung der örtlichen Steifigkeit in Schiffsquerrichtung über die orthotrope Biegesteifigkeit
- Berücksichtigung von Biege- und Schubsteifigkeit der Unterzüge durch Trägheitsmoment und Schubfläche der Balken
- Die mit diesem Modell verbundene Vernachlässigung der Schubverformung der Rahmenbalken führt mit zunehmender Steghöhe zu einer zu steifen Modellierung

Trägerrost/Scheibenmodell

Idealisierung der Rahmenbalken (ggf. Zusammenfassung mehrerer Balken bei globalen Untersuchungen) und der Unterzüge durch einen Trägerrost (Element Typ 2), Berücksichtigung der Beplattung durch Scheibenelemente (Typ 3). Analog Doppelboden

Unsymmetrische Deckeausschnitte

Wird aus Aufwandsgründen ein die Symmetrie voraussetzendes Halbmodell gewählt, ist zu sichern, daß im Bereich unsymmetrischer Ausschnitte die Gurtwirkung des Decks für den Schiffskörper möglichst genau erfaßt wird. Das kann erreicht werden durch symmetrische Anordnung des Ausschnittes. Dadurch wird der Spannungszustand in der Nähe der freien Querränder der Ausschnitte besser erfaßt, als mit einer abgeminderten Plattendicke im Bereich des Ausschnittes. Das lokale Schwingungsverhalten an solchen Stellen ist mit dem Halbmodell nicht zu ermitteln.

Freiheitsgrade

Wird das Scheibenmodell mit Fachwerkstäben verwendet, ist lediglich die Verschiebung in Schiffslängsrichtung offenzulassen.

Bei den anderen Modellen sind zusätzlich die Plattenfreiheitsgrade zuzulassen, für lokale Berechnungen kann der Längsfreiheitsgrad behindert werden.

4. Aufbauten

4.1. Ebene Modelle

Reduktion des Aufbaus auf ein ebenes Modell, bestehend aus Scheiben (Typ 3) und Fachwerkstäben (Typ 1)

Längswände

- Die Scheibendicken ergeben sich aus den Blechdicken der über mehrere Decks und die Aufbautenlänge durchgehenden tragenden Längswände
- Die Versteifungen und leichte Trennwände werden vernachlässigt
- Gesickte Längswände werden durch orthotrope Elastizitätskonstanten erfaßt

Decks

- Die Längssteifigkeit der Decksbeplattung und der Untersüge wird durch Fachwerkstäbe erfaßt
- Quergesickte Decks sind zu vernachlässigen.

Querwände

- Die Biegesteifigkeit der Querwände einschließlich ihrer Versteifung kann gegenüber der großen Schubsteifigkeit der Längswände vernachlässigt werden
- Die Scheibensteifigkeit in Vertikalrichtung kann bei gedrungenen Aufbauten ebenfalls unberücksichtigt bleiben, bei turmartigen Aufbauten sind Fachwerkstäbe zur Erfassung der Gurtwirkung des Front- und Achterschottes bei Biegeverformung einzuführen.

Für Aufbauten mit über Höhe und Länge durchgehenden Längswänden ist das ebene Modell geeignet. Unregelmäßige Aufbauten mit Querversatz in den Längswänden sollten mit räumlichen Modellen berechnet werden.

4.2. Räumliche Modelle

Modellierung durch orthotrope Scheiben (Typ 3), Balken (Typ 2) und Stäbe (Typ 1)

Längs- und Querwände

- Als Scheibendicken der Elemente werden die Blechdicken gewählt, Versteifungen sind durch orthotrope Elastizitätskonstanten oder Fachwerkstäbe zu erfassen
- Aus versetzt stehenden Wänden dürfen durch Verschiebung in die Netzebenen keine durchgehenden Schubwände entstehen

Decks

- Verwendung isotroper Scheibenelemente, dabei Vernachlässigung der Deckbalken, quergesickte Decks bleiben unberücksichtigt
- Bei überkragenden Decks ist die Biegeversteifung durch Balkenelemente zu modellieren
- Durchgehende Unterzüge werden als Fachwerkstäbe erfaßt
- Ununterstützte Knoten von Scheibenelementen und Fachwerkstäben in den Decksebenen sind zu vermeiden (ggf. fiktive Fachwerkstäbe als Stützen einführen)

4.3. Netzteilung und Freiheitsgrade

Die Netzteilung muß so gewählt werden, daß die wesentlichen Konstruktionselemente direkt ohne Verschiebungen im Modell erfaßt werden können. Ausreichende Berechnungsgenauigkeit wird erreicht mit 4 - 5 Elementen über die Schiffslänge, 2 - 3 Elementen über die halbe Breite und Netzebenen in jedem Deck.

Für die mit diesen Modellen berechenbaren Globalschwingungen des Aufbaus ist es ausreichend, die Verschiebungen in vertikaler und Schiffslängsrichtung zuzulassen.

4.4. Berechnung der Aufbautenschwingungen

Die beschriebenen Modelle können eingesetzt werden für eine entkoppelte Berechnung der Aufbauten und für die Ermittlung der gekoppelten Schwingungen von Schiffskörper und Aufbau.

4.4.1. Entkoppelte Berechnung des Aufbaus

Die entkoppelte Berechnung kann erfolgen mit

- Einspannung am Fuß
- Federn am Aufbaufuß zur näherungsweise Berücksichtigung der statischen Anschlußsteifigkeit
- Modellierung der Stahlkonstruktion (masselos) unterhalb des Aufbaus zur genaueren Berücksichtigung der statischen Anschlußsteifigkeit

Die entkoppelte Behandlung gestattet keine Zwangsschwingungsberechnung, da die Erregerkräfte am Schiffskörper angreifen. Es können deshalb lediglich Resonanzgefahren erkannt werden. Bei ausreichendem Abstand zwischen Eigen- und Erregerfrequenzen sind keine weiteren Untersuchungen erforderlich. Bei der Bewertung der Ergebnisse muß jedoch berücksichtigt werden, daß wegen der Kopplung der Eigenfrequenzspektren von Aufbau und Schiffskörper die entkoppelte Berechnung nur eine Näherung ist. Resonanzen des Heck-/Aufbautenbereiches können bei solchen Berechnungen nicht erkannt werden.

4.4.2. Heck-/Aufbautenschwingungen

Für eine genauere Berechnung der freien und erzwungenen Schwingungen des Heck-/Aufbautenbereiches ist ein 3-dimensionales FE-Modell für Heck und Aufbau in Verbindung mit einem Timoshenkobalken für den verbleibenden Schiffskörper zu empfehlen. Dieses Modell hat folgende Vorteile:

- Keine Unsicherheiten bei der Bestimmung der statischen Anschlußsteifigkeit durch konstruktionsgerechte Idealisierung des Achterschiffes,
- Erfassung der Kopplung von Aufbautenschwingungen mit Vertikal- und Längsschwingungen des Schiffskörpers,
- Berücksichtigung eines evtl. Einflusses der Doppelbodenschwingungen im Maschinenraum,
- Möglichkeiten einer Zwangsschwingungsrechnung infolge der am Heck angreifenden Propellererregung.

5. Massenverteilung

5.1. Schiffsmasse und Zuladung

Die Masse kann als Einzelmasse in den Knoten oder/und über die Materialdichte der Elemente erfaßt werden. Über die Elementdichte eingegebene Massen werden programmintern auf die Randknoten der Elemente verteilt (konzentrierte Massenmatrix). Für die Wahl der Eingabe ist deshalb allein die Form der Masserechnung und der Arbeitsaufwand für die Verteilung ausschlaggebend. Um den Arbeitsaufwand zur Veränderung des Datensatzes bei der Berechnung mehrerer Ladefälle gering zu halten, sollte die Ladung stets über Einzelmassen eingegeben werden.

Die Massenverteilung ist so vorzunehmen, daß Längen-, Breiten- und Höhenkoordinaten der Teilmassen im Modell möglichst gut mit der Realität übereinstimmen.

Besonderen Einfluß auf die Berechnungsgenauigkeit haben bei

- Schiffskörperschwingungen die Längsverteilung
- Aufbautenschwingungen die Verteilung über die Aufbautenhöhe
- Ladungsdecks und Doppelboden die Längs- und Querverteilung

5.2. Hydrodynamische Masse

Die Verwendung eines räumlichen FEM-Modells ermöglicht es, die Linienführung des Schiffskörpers in ihrer tatsächlichen Gestalt nachzubilden. Entsprechend muß dann auch, besonders wenn das Schwingungsverhalten des Doppelsbodens mit erfaßt werden soll, die aus der hydrodynamischen Beschleunigungsdruckverteilung resultierende örtliche hydrodynamische Masse berücksichtigt werden. Zur Berechnung der hydrodynamischen Massenverteilung über die Querschnitte wurde ein an der WFU Rostock entwickeltes Programm auf der Grundlage des Singularitätenverfahrens modifiziert und durch einen Programmteil ergänzt, der die Ermittlung der diskreten Massen entsprechend der Elementteilung des FEM-Modells ermöglicht /7/.

Aus der ebenen Spantumströmung ermittelte hydrodynamische Massen müssen näherungsweise zur Berücksichtigung der räumlichen Umströmung reduziert werden. Die schwingformabhängigen Korrekturfaktoren können z. B. mit dem Programm VERSCHWI berechnet werden. Bei der FEM-Rechnung kann nur ein konstanter Wert berücksichtigt werden, der entsprechend dem interessierenden Frequenzbereich auszuwählen ist. Das berechnete Eigenfrequenzspektrum ist folglich auch nur für diesen Frequenzbereich verwendbar und ggf. muß die Berechnung mit anderen Korrekturfaktoren wiederholt werden, wenn mehrere Frequenzbereiche interessieren.

6. Zwangsschwingungsberechnung

6.1. Dämpfung

Die Genauigkeit von Zwangsschwingungsberechnungen, besonders die Resonanzamplituden, werden durch die Dämpfung entscheidend beeinflusst. Wegen der verschiedensten physikalischen Einflüsse ist eine Analyse noch nicht mit ausreichender Sicherheit möglich. Deshalb müssen für Projektberechnungen experimentell ermittelte Werte vergleichbarer Schiffe und Konstruktionen übernommen werden. Dabei ist die Bestimmung der modalen Dämpfungen komplizierter Systeme mit eng ge-

koppelten Frequenzspektren (z.B. Schiffskörper/Aufbau) aus Experimenten noch nicht befriedigend geklärt.

Aus der Literatur sind folgende Verfahren zur Erfassung der Dämpfung bekannt, die im Schiffbau angewendet werden:

- konstante kritische Dämpfung für alle Schwingformen
- schwingformabhängige kritische Dämpfung
- steifigkeits- und masseproportionale Dämpfung

Wegen der stark streuenden Dämpfungskonstanten werden die vom ISSC 1982 /8/ für die einzelnen Teilstrukturen angegebenen Werte für die kritische Dämpfung empfohlen (Bild 3).

Besonders große Streuungen ergeben sich für Aufbauten und Aufbautendecks. Im allgemeinen ist der Aufbau selbst in seinen unteren Schwingungsgraden sehr schwach gedämpft. Für Schwingformen, die weitgehend entkoppelte Aufbautenschwingungen erkennen lassen, ist deshalb die geringste Dämpfung, d. h. die untere Bereichsgrenze zu wählen. Erhöhte Dämpfung tritt mit zunehmender Kopplung mit Schiffskörperschwingungen auf. Wenn die Schwingform des Aufbaus vollständig durch den Schiffskörper bestimmt wird, gilt die obere Bereichsgrenze, die mit den Dämpfungskonstanten des Schiffskörpers übereinstimmt.

6.2. Erregergrößen

Die FEM gestattet es, harmonisch veränderliche Kräfte und Momente an beliebigen Knoten einzuleiten.

Für die Ermittlung der Propellererregung steht im Industriezweig Schiffbau das Berechnungsprogramm NV 570 /9/ zur Verfügung, mit dem sowohl die Kräfte und Momente am Propeller als auch die durch Druckschwankungen an der Außenhaut entstehenden Erregungen berechnet werden können. Dabei können die Kräfte und Momente am Propeller in der Regel gegenüber den Druckschwankungen vernachlässigt werden. Die aus Integration der Druckschwankungen erhaltenen Erregungen werden als Einzelkräfte an einem oder mehreren Außenhaut-

- (M) Measured values (all effects included)
- (T) Theoretical calculations of single effect

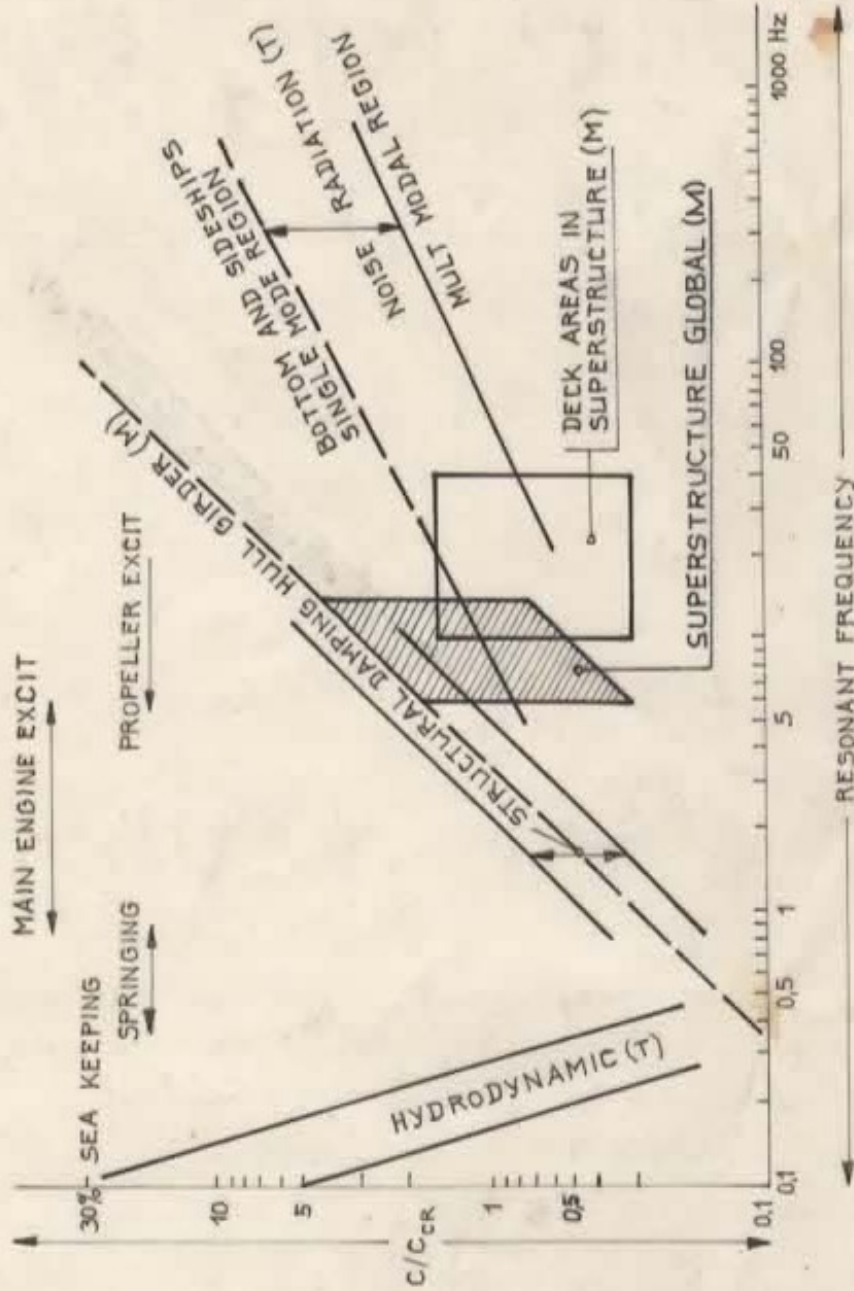


Bild 3 : Dämpfungswerte für Projektberechnung globaler und lokaler Schwingungen in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz

knoten oberhalb des Propellers eingeleitet. Über den Einfluß örtlicher Deformationen an den Krafteinleitungsstellen auf die Globalschwingungen bestehen noch Unsicherheiten.

Für den Motor sind in der Regel quantitativ nur die freien Massenmomente 1. und 2. Ordnung bekannt, die zu Balkenschwingungen des Schiffskörpers führen und keine aufwendigen FE-Modelle erfordern.

7. Durchführung der Berechnungen

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden FEM-Berechnungen wegen des verhältnismäßig hohen Arbeits- und Rechenkostenaufwandes nur für besonders schwingungsgefährdete Schiffstypen und neue Erzeugnisse, für die keine Erfahrungen vorliegen, empfohlen.

Kriterien für die Notwendigkeit solcher Berechnungen sind:

- Größe der Propellererregung, die von Leistung, Schiffsförm und Propeller abhängt
- Abstand des Wohn- und Arbeitsbereiches vom Propeller
- Form und Anordnung des Aufbaus
- Stahlschiffbauliche Gestaltung und Einbindung in den Schiffskörper
- Vorhandensein großer Teilsysteme, die Einfluß auf die Schiffskörperschwingungen haben und selbst schwingungsgefährdet sind (Ladungsdecks, Doppelboden)
- In der frühen Projektierungsphase durch Anwendung von Näherungsmethoden erkannte Resonanzgefahr
- Erfüllung von Forderungen von Aufsichtsorganen und Auftraggeber

Eine grundsätzliche Schwierigkeit bei FEM-Berechnungen besteht darin, daß detaillierte Angaben benötigt werden, die erst zu einem Zeitpunkt vorliegen, wenn Projektänderungen

auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse kaum noch durchsetzbar sind. Es ist deshalb zweckmäßig, derartige Rechnungen möglichst frühzeitig mit groberen Ausgangsdaten unter gewisser Genauigkeitseinbuße durchzuführen.

Eine Projektberechnung sollte folgenden Umfang haben:

- Eigenschwingungsrechnung für zwei extreme Ladefälle bis zum 1,25-fachen der Propellerblattfrequenz
- Zwangsschwingungsrechnung für wichtige Betriebszustände zur Bestimmung der Zwangsschwingform
- Berechnung der Amplituden-Frequenzgänge für ausgewählte Knoten, die zur Charakterisierung des Schwingungsverhaltens der verschiedenen Strukturen geeignet sind.

Literatur

- /1/ Pahl, Stein,
Wunderlich
Finite Elemente in der Baupraxis
Wilhelm Ernst und Sohn
Berlin - München - Düsseldorf 1978
- /2/ Zienkiewicz
Methode der finiten Elemente
VEB Fachbuchverlag Leipzig 1974
- /3/ Schmits
F/E-Thema: Schwingungsbekämpfung
im Heck-/Aufbautenbereich -
Bericht 8
KSR 1982
- /4/ Geßner
F/E-Thema: Eigen- und Zwangs-
schwingungsverhalten von Schiffs-
konstruktionen - Bericht 6
KSR 1984
- /5/ Germanischer Lloyd
Zulässige Schwingungen an Bord von
Schiffen
BMFT - Forschungsvorhaben MTK 0058
- /6/
Schiffbautechnisches Handbuch
1. Band
Berlin 1966
- /7/ Langecker
Berechnung der hydrodynamischen
Trägheitsgrößen
F/E-Thema: Schwingungen von An-
triebsanlagen
KSR 1982
- /8/
ISSC Report II.4 1982 Steady-
state Dynamic Loadings and Response
- /9/
Computer Programm NV 570
Det Norske Veritas