

Abschlußbericht

Förderkennzeichen: 13N6990/0

Nichtlineare Dynamik

Thema:

**Schwimmkrane als technisches
Problem der Nichtlinearen Dynamik**

Teilprojekt: Experimentelle Validierung der
numerischen Simulation

Institut für Schiffs- und Meerestechnik der
Technischen Universität Berlin

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. G.F. Clauss

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. C. Abt, Dipl.-Ing. M. Vannahme

Berlin, Juli 2000

Vorwort

Als Henry Ford gefragt wurde, warum er trotz hervorragender Absatzzahlen noch Reklame für seine *Ford Lizzy* mache, erklärte er, daß Hühner nach dem Eierlegen laut gackern, während Enten still bleiben – und die ganze Welt ißt Hühnereier. Publikationen – in Fachkonferenzen, aber auch in Zeitungen – sind so wichtig wie dieser Bericht. Wir beginnen daher mit einem Zeitungsbericht und fügen im Anhang die wichtigsten Veröffentlichungen bei.

G.F. Clauss

M. Vannahme

C. Abt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	5
1.1	Einleitung	5
1.2	Ziel des Gesamtprojektes	7
1.3	Teilaufgabe der TU Berlin	7
2	Ablauf des Forschungsvorhabens	9
3	Theoretische Grundlagen	11
3.1	Lineare Theorie	11
3.2	Verankerungen	13
4	Versuchseinrichtungen	16
4.1	Der Wellenkanal	16
4.2	Bewegungsmessung	17
4.2.1	Induktive Weggeber	17
4.2.2	Beschleunigungsmeßrahmen	20
4.2.3	Lagereferenzsystem	22
4.2.4	Bestimmung der Pendelbewegung der Last mit Hilfe der Seilkraft	26
4.2.5	Bestimmung der Pendelbewegung der Last mit induktiven Weggebern	26
4.3	Verankerungskräfte	27
4.3.1	Verankerungscharakteristik	28
4.3.2	Entwurf der Nichtlinearen Verankerung	29
4.4	Schwimmkranmodelle	32
4.4.1	Kranbarge <i>MAGNUS</i>	32
4.4.2	Kranschiff <i>CASTORO OTTO</i>	32
4.4.3	Kranhalbtaucher <i>THIALF</i>	34
4.5	Auswertung	39
5	Ergebnisse	41
5.1	Verankerungen	41
5.2	Kranbarge <i>MAGNUS</i>	41
5.3	Kranschiff <i>CASTORO OTTO</i>	44
5.4	Kranhalbtaucher <i>THIALF</i>	49

5.5	Beobachtungen	50
6	Bewertung	54
7	Zusammenfassung	56
8	Dankwort	57

Nomenklatur

A		Transformationsmatrix
F	[N]	Kraftvektor
<i>R</i>		nichtlineare Fehlerglieder
X	[m]	Ortsvektor
a	[m/s ²]	Beschleunigung
c	[m]	Ortsvektor vom raum- zum körperfesten System
<i>H</i>	[m]	Wellenhöhe
<i>L</i>	[m]	Wellenlänge
<i>S</i>	[m ²]	Kontrollfläche
<i>V</i>	[m ³]	Kontrollvolumen
<i>e</i>		Einheitsvektoren
<i>f</i>	[rad/s ²]	Winkelbeschleunigung
<i>g</i>	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
<i>k</i>	[m]	Wellenzahl
$\hat{\mathbf{k}}_0$		Einheitsvektor in z_0 -Richtung
<i>l</i>	[m]	Seil- oder Fadenlänge
<i>r</i>	[m]	radiale Entfernung
s_1, s_2, s_3	[m]	translatorische Starrkörperbewegungen
s_4, s_5, s_6	[rad]	rotatorische Starrkörperbewegungen
s_7, s_8, s_9	[m]	absolute Lastbewegung
$s_{7_{rel}}, s_{8_{rel}}$	[m]	relative Lastbewegung
<i>t</i>	[s]	Zeit
<i>w</i>	[m]	Weggebersignale
<i>x, y, z</i>	[m]	Koordinaten
v	[m/s]	Geschwindigkeitsvektor
β	[rad]	Verdrehwinkel der nichtlinearen Umlenkrolle zur Simulation der Verankerungsmechanik
Ω		Winkelgeschwindigkeitstensor
ϕ	[m ² /s]	Strömungspotential
ω	[rad/s]	Wellenkreisfrequenz
ω	[rad/s]	Vektor der Winkelgeschwindigkeiten
ϕ	[rad]	Rollwinkel
θ	[rad]	Stampfwinkel
ψ	[rad]	Gierwinkel
φ	[rad]	Winkel der schwingenden Last
ζ_a	[m]	Amplitude der Initialwelle

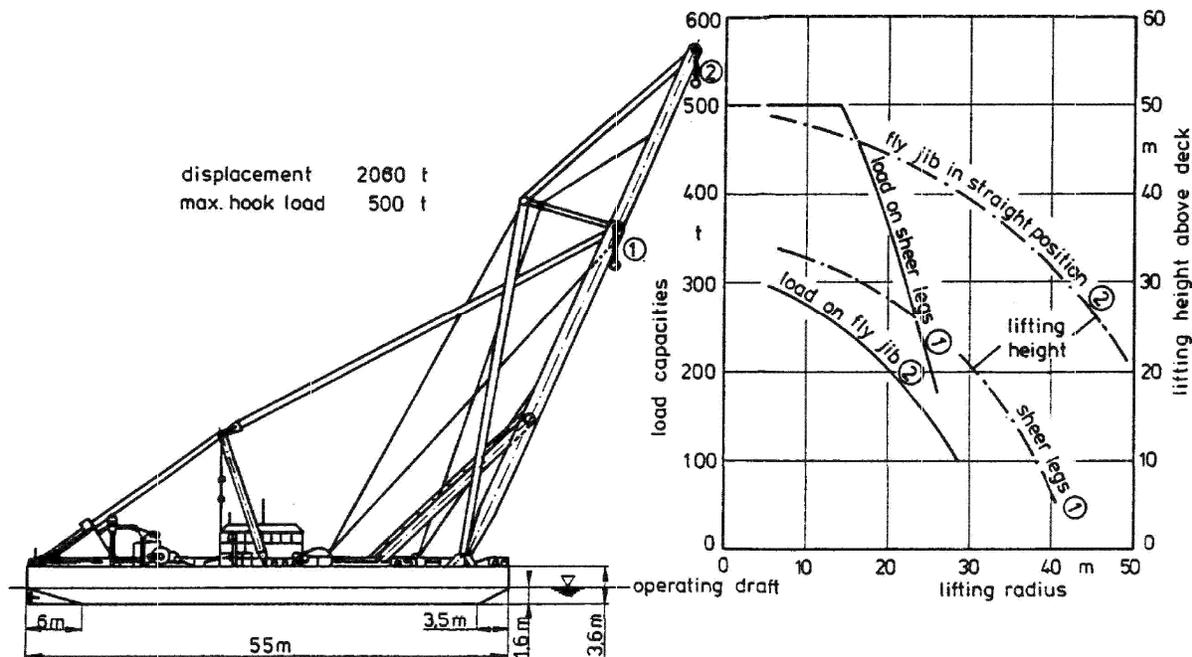


Abb. 1: Kranbarge MAGNUS

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Einleitung

Schwimmkrane werden für Installationsarbeiten von Offshore-Bauwerken, als Transport-, Bergungs- und Hebefahrzeug sowie für den Ladungsumschlag von Schwer- und Massengütern eingesetzt. Hubkapazitäten von bis zu 14.000 t (Saipem S-7000) ermöglichen Bewegungen von großen Baugruppen wie Jackets, Wohnraummodulen oder Risern, wodurch diese an Land gefertigt werden können. Die Fertigung großer Module an Land führt zu einer erheblichen Kosten- und Zeitersparnis, da sie unabhängig von Wetter- und Seegangsbedingungen durchgeführt werden kann. Eine deutliche Zeitersparnis wird auch beim Einrammen von Verankerungspfählen durch Schwimmkrane erreicht. In küstennahen Gebieten und Häfen werden mit Schwimmkranen Ladungen umgeschlagen, für die es keine geeigneten landseitigen Umschlagvorrichtungen gibt, für diese nicht zugänglich sind oder der Schwimmkran die kostengünstigere Alternative darstellt.

In den rauen Umgebungsbedingungen der Nordsee haben sich besonders Kranhalbtaucher während vieler Einsätze bewährt und werden daher auch bei der Erschließung neuer Ölfelder in Tiefseegebieten z.B. im Golf von Mexiko und vor der afrikanischen Westküste eingesetzt. Wachsendes Umweltbewußtsein und der dadurch erzeugte öffentliche Druck führten im Jahre 1996 zur umweltverträglichen Demontage der Brent-Spar, was nur mit Hilfe von Schwimmkranen zu bewerkstelligen war. In den nächsten Jahren ist mit der Demontage und Entsorgung hunderter ausgedienter Offshore-Anlagen zu rechnen, was für die Betreiber von Schwimmkranen ein enormes Auftragspotential darstellt.

Der Trend zur modularen Fertigung von Baugruppen an verschiedenen Orten ist in weiten Bereichen des Anlagen- und Maschinenbaus deutlich zu erkennen, wobei die Größe der einzelnen Module kontinuierlich wächst. Der Transport solcher Baugruppen kann in der Regel nur auf dem Seeweg durchgeführt werden, was steigende Schwimmkrankapazitäten für das Verladen erforderlich macht. Bei zukünftigen Einsätzen muß häufig von komplizierten Kranoperationen ausgegangen werden, bei denen heutige Schwimmkrane an ihre Betriebsgrenzen stoßen. Für Kranoperationen bei schlechtem Wetter, Seegang oder extremen Lasten sind vorherige Simulationen notwendig, um die dabei

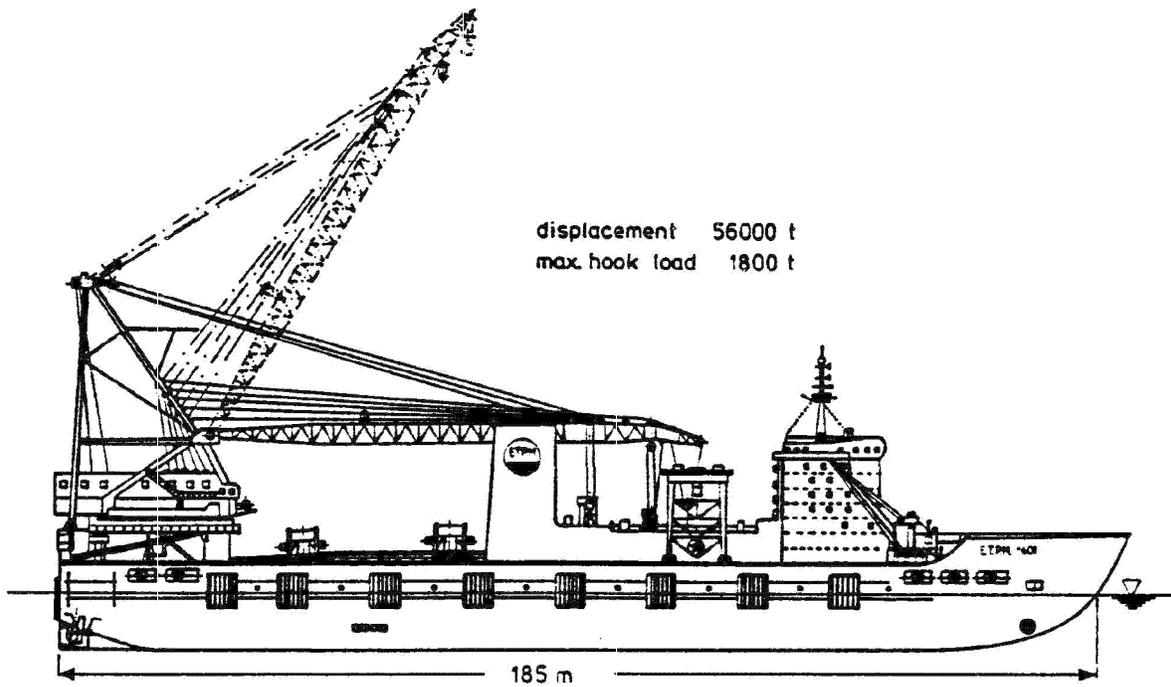


Abb. 2: Kranschiff CASTORO OTTO

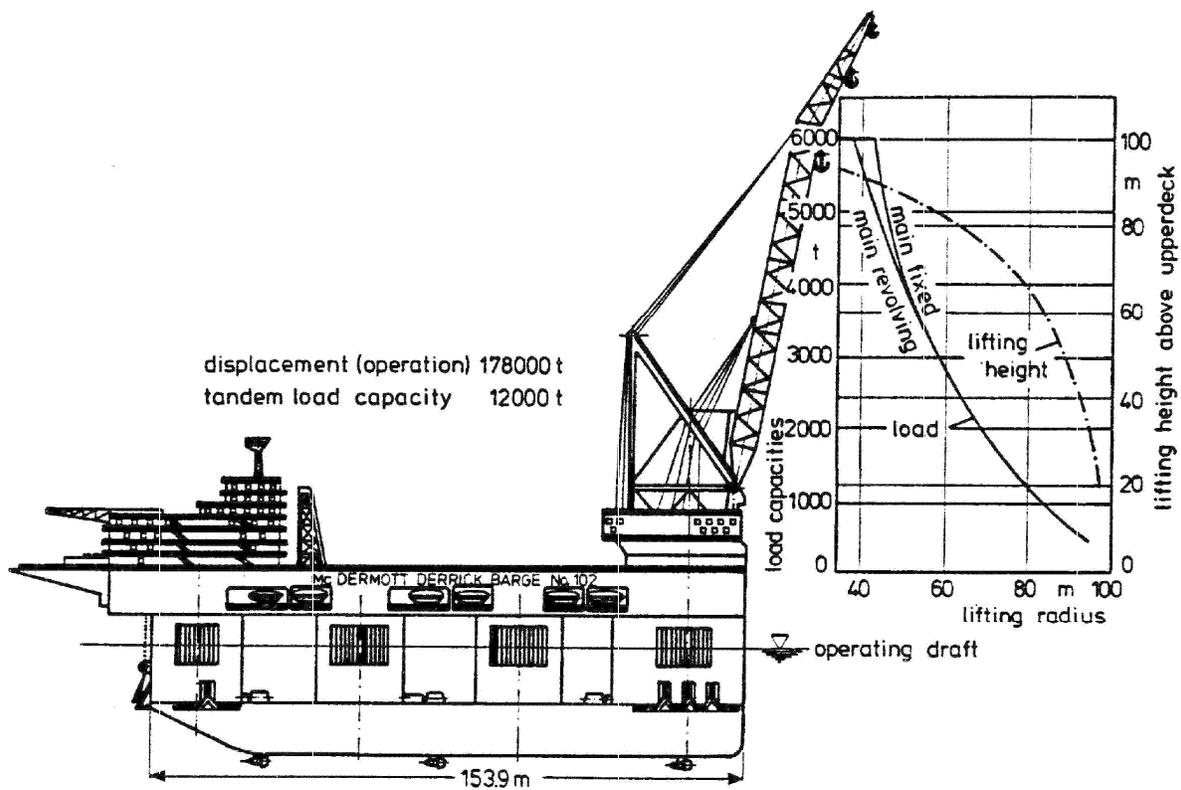


Abb. 3: Kranhalbtaucher THIALF

auftretenden Risiken abschätzen und eine sicherheitstechnische Bewertung durchführen zu können. Die Dynamik von Schwimmkränen ist durch die Kopplung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung des Schwimmkörpers und der Pendelbewegung der schwingenden Last gekennzeichnet. Für die Analyse und somit die sicherheitstechnische Bewertung der Kranoperation ist die genaue Kenntnis über das dynamische Verhalten des Systems notwendig, wobei alle nichtlinearen Effekte der pendelnden Last und des Schwimmkörpers Berücksichtigung finden müssen.

1.2 Ziel des Gesamtprojektes

Gesamtziel des Forschungsvorhabens „*Schwimmkrane als technisches Problem der Nichtlinearen Dynamik*“, in Kooperation mit der Technischen Universität Hamburg-Harburg und dem Germanischen Lloyd, ist eine verbesserte Beschreibung der nichtlinearen Dynamik von Schwimmkränen für die Vorhersage kritischer Betriebszustände und der Einsatzgrenzen im Seegang. Mit den gewonnenen Erkenntnissen des Verbundvorhabens soll die sicherheitstechnische Bewertung der Dynamik von Schwimmkranoperationen verbessert werden. Als Referenzmodelle dienen dabei drei typische Schwimmkrane unterschiedlicher Bauform: Kranbarge (Abb. 1), Kranschiff (Abb. 2) und Kranhalbtaucher (Abb. 3). Mit der Entwicklung mathematischer Modelle, der darauf aufbauenden numerischen Simulation, der systematischen Analyse des Bewegungsverhaltens mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik und der experimentellen Validierung soll eine genaue Vorhersage der Einsatzgrenzen ermöglicht werden. Die Analysewerkzeuge und Erkenntnisse aus dem Verbundprojekt sollen in zukünftige Entwurfs- und Berechnungsprogramme, in Richtlinien für den Bau und die Klassifikation von Schwimmkränen sowie von Kranoperationen aufgenommen werden.

Das nichtlineare Bewegungsverhalten dieser Hebefahrzeuge ist primär durch die Kopplung der Hydrodynamik des Schwimmkörpers, der Verankerung und der Pendelbewegung der frei schwingenden Last charakterisiert. Mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik sollen kritische Parameter identifiziert werden, die in Verzweigungsanalysen systematisch variiert werden. Zusätzlich sind Störkräfte durch Stoßvorgänge der schwingenden Last mit schwimmenden Strukturen (Transportbargen) oder die Wirkung hoher Wellen zu berücksichtigen. Das Zusammenwirken des Seegangs und der nichtlinearen Rückstellkräfte führt zu unregelmäßigen (chaotischen) oder subharmonischen (mehrperiodischen) Bewegungen, und muß bei der experimentellen und numerischen Simulation des Bewegungsverhaltens berücksichtigt werden.

1.3 Teilaufgabe der TU Berlin

Ziel des Teilprojektes der TU Berlin ist die experimentelle Analyse von drei Schwimmkranmodellen der in den Abbildungen 1 bis 3 dargestellten Bauformen. Mit den experimentellen Daten soll das an der TU Hamburg-Harburg entwickelte numerische Verfahren zur Beschreibung der nichtlinearen Dynamik von Schwimmkränen validiert werden. Die in den Versuchen verwendeten Systemparameter dienen dabei als Eingabegrößen für die numerische Simulation.

Die Modelle der Schwimmkrane im Maßstab 1:25 (Kranbarge) sowie 1:75 (Kranschiff und -halbtaucher) werden im Wellenkanal der TU Berlin untersucht. Ziel der Versuche ist das Auffinden nichtlinearer Bewegungsformen der verankerten Schwimmkrane und der für dieses Verhalten notwendigen Systemparameter. Untersucht werden qualitative und quantitative Änderungen der Schwingungsformen von pendelnder Last und Kranbewegung bei sich ändernden Seegangsverhältnissen. Variationen der Systemparameter werden durchgeführt, um ein breites Spektrum an Daten zur Überprüfung der Gültigkeit der numerischen Simulation bereitzustellen. Um die Dynamik der Großausführungen im Modellmaßstab wiederzugeben, müssen nichtlineare Rückstellkräfte der Verankerung im Versuch simuliert werden. Das Bewegungsverhalten des gekoppelten Systems wird im Zeitbereich analysiert und die Ergebnisse den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Neben der

für das nichtlineare Verhalten charakteristischen Längsbewegung werden weitere Zustandsgrößen gemessen, die für einen Vergleich von numerischer Simulation und Experiment notwendig sind.

2 Ablauf des Forschungsvorhabens

Die Laufzeit des Teilprojektes der TU Berlin betrug ursprünglich 33 Monate, vom 01.01.1997 bis zum 30.09.1999. Aufgrund der verspäteten Aufnahme der Forschungsarbeit und der Notwendigkeit nach umfangreicheren Versuchen, wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Gesamtprojektes bis zum 31.03.2000 beantragt. Für das Teilprojekt der TU Berlin wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Laufzeit bis zum 31.01.2000 beantragt. Die beantragten Verlängerungen wurden vom Projektträger mit Beschluß vom 02.06.1999 genehmigt.

Im folgenden soll zunächst auf die Durchführung des Teilvorhabens an der TU Berlin eingegangen werden. Die Aufgabe lag im Rahmen der Kooperation mit der TU Hamburg-Harburg und dem Germanischen Lloyd in der Durchführung von Modellversuchen und der Bereitstellung von Ergebnissen und Parametersätzen der Messungen. Hierbei konnte auf große Erfahrung im meeres-technischen Versuchswesen, insbesondere bei der Erzeugung definierter Seegänge und in der Versuchsauswertung aufgebaut werden. Die hierfür existierenden Verfahren wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes sukzessive weiterentwickelt.

Die Planung des Vorhabens sah Versuche mit einer Kranbarge, einem Kranschiff und einem Kranhalbtaucher vor, deren Bewegungsverhalten untersucht werden sollte. Durch die umfangreichen Versuchsauf- und umbauten, die zur Untersuchung der verschiedenen Schwimmkrantypen notwendig waren, bestimmten drei Versuchsphasen maßgeblich den Ablauf des Forschungsvorhabens. Begonnen wurde mit den Untersuchungen des Kranpontons, was die Entwicklung einer Verankerungsmechanik, die Erweiterung von Meßsoft- und Hardware, Installation geeigneter Meßtechnik und die Bestimmung der Parameter des Pontons beinhaltete. Von besonderem Interesse war die Erzeugung mehrperiodischer Schwingungen und die Entwicklung einer Methode, mit der diese wiederholbar erzeugt werden können. Nachdem verschiedene Parameterkonfigurationen identifiziert waren, bei denen ein- und mehrperiodische Bewegungsformen koexistieren, wurden Messungen durchgeführt, die in einer ersten Phase der Auswertung analysiert wurden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden weitere Versuche mit der Kranbarge durchgeführt, anschließend das Kranschiff und – nach Auswertung der daraus gewonnenen Daten – der Kranhalbtaucher in ähnlicher Weise untersucht. Aufgrund der unterschiedlichen Bauformen und Modellmaßstäbe war die Entwicklung neuer Verankerungsmechanismen und die wiederholte Modifikation der Meßtechnik notwendig.

Für ausgewählte Parameterkonfigurationen, bei denen die Existenz mehrperiodischer Bewegungsformen nachgewiesen werden konnte, sind Untersuchungen durchgeführt worden, die eine Aussage über die Stabilität der einperiodischen Schwingung liefern sollten. Dazu wurde das eingeschwungene System durch unterschiedliche Methoden gestört und beobachtet, ob sich ein mehrperiodischer Modus einstellte, oder ob das System wieder die einperiodische Bewegungsform annahm. Die Störungen wurden stoßartig und kontinuierlich sowohl am Schwimmkörper, als auch an der Last eingeleitet.

Während der Versuchsphasen mit verschiedenen Schwimmkrantypen wurden Systemparameter variiert, um ihren Einfluß auf die Stabilität der jeweiligen eingeschwungenen Bewegungsform zu untersuchen. Für alle Krantypen stellten sich Verankerungs- und Seegangscharakteristik als maßgebliche Größen für die Existenz der – durch die Längsbewegungen charakterisierten – mehrperiodischen Schwingungen heraus. Variationen der Last und der Seillänge zeigten im Versuch keine reproduzierbaren Veränderungen des Bewegungsverhaltens der Modelle.

Im Verlauf des Projektzeitraumes wurden Ergebnisse des Forschungsvorhabens mit Beteiligung der TU Berlin auf vier Konferenzen präsentiert:

- Clauss, G.F.; Vannahme, M.: *An Experimental Study of the Nonlinear Dynamics of Floating Cranes*, ISOPE-99, Brest, Frankreich, 30. Mai - 4. Juni 1999 , (Anlage 1)

- Kreuzer, E.; Clauss, G.F.; Schellin, T.E., et al.: *Schwimmkrane als technisches Problem der Nichtlinearen Dynamik*, VDI Statusseminar, Frankfurt, 23./24. Februar 1999 , (Anlage 2)
- Clauss, G.F.; Abt, C.; Stutz, K.: *Non-linear Crane Vessel Dynamics*, Euromech 398, Fluid Structure Interaction in Ocean Engineering, Hamburg, 11.-15. Oktober 1999, (Anlage 3)
- Clauss, G.F.; Vannahme, M.; Ellermann, K.; Kreuzer, E.: *Subharmonic Oscillations of Moored Floating Cranes*, OTC'2000, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 1.-4. Mai 2000. (Anlage 4)

Zeitplan TU Berlin -

Schwimmkrane als technisches Problem der Nichtlinearen Dynamik

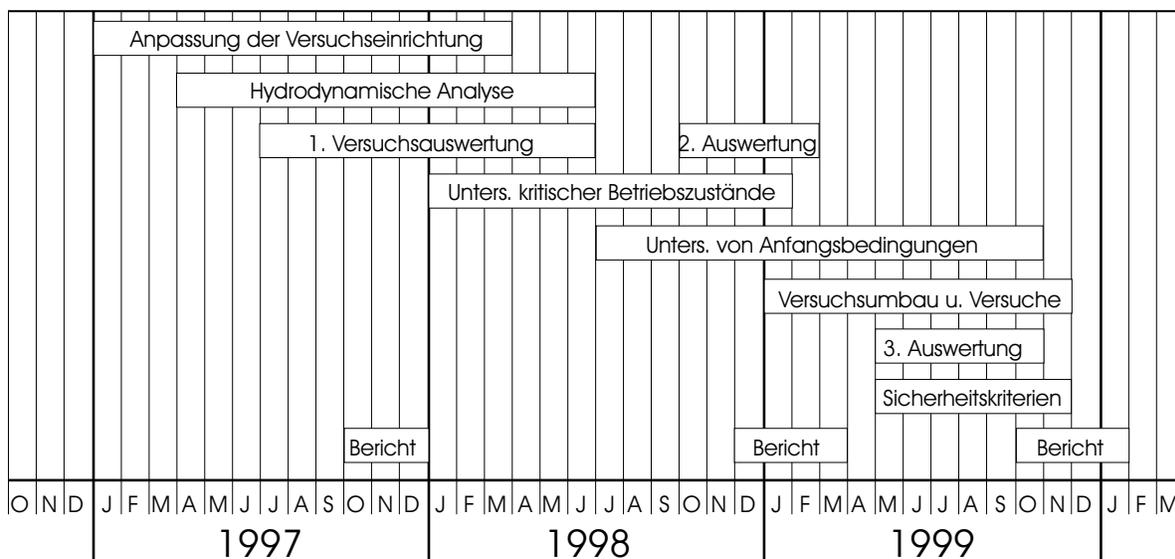


Abb. 4: Balkenplan des Teilprojektes

3 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Untersuchungen über das nichtlineare Bewegungsverhalten der Schwimmkrane werden im Rahmen des Forschungsvorhabens von der Technischen Universität Hamburg-Harburg bearbeitet. Die Grundlagen für die Verankerungen und die Bewertung der Sicherheitskriterien für den Betrieb werden vom Germanischen Lloyd bereitgestellt.

Für den Betrieb von Schwimmkranen sind nur bestimmte Freiheitsgrade von praktischer Relevanz, und die Werte, die relevante Zustandsgrößen annehmen dürfen, liegen in engen Grenzen. Zur Verbesserung des Verständnisses der Problematik soll hier ein kurzer Überblick über die für Messungen interessanten Teilbereiche des Systems – Schwimmkran mit hängender Last – gegeben werden. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der Beschreibung der Kopplung von Last und Schwimmkörper sowie der hydrodynamischen Wechselwirkungen unterschiedlicher Betriebszustände. In Abschnitt 3.2 werden Wirkungsweise und Charakteristik von Verankerungen erläutert und der Zusammenhang zwischen Ankerkraftmodellierung und mathematischem Modell hergestellt.

3.1 Lineare Theorie

Zur Vorbereitung dieses Forschungsvorhabens wurde an der TU Berlin ein linearisiertes Modell zur Berechnung des Seegangsverhaltens von Schwimmkranen und zur Bestimmung ihrer Einsatzgrenzen (Riekert, 1992, Clauss und Riekert, 1990 und 1992) weiter entwickelt und verifiziert. Die mechanischen Zusammenhänge des linearisierten Modells werden im folgenden kurz erläutert.

Ein Schiff – als starrer Schwimmkörper – hat sechs Freiheitsgrade, die durch die in Abb. 5 aufgeführten Bewegungen s_1 - s_6 beschrieben werden. Zur Erfassung aller charakteristischen Größen des gekoppelten Systems wird die Pendelbewegung der Last mit zwei weiteren Freiheitsgraden – den Pendelwinkeln φ_1 und φ_2 – einbezogen. Das Gesamtsystem besitzt somit acht Freiheitsgrade. Auf eine Betrachtung der Lastrotation um ihre Hochachse wird verzichtet, da diese Bewegung nur bedingt angeregt wird und gegebenenfalls durch Tuggerlines eingeschränkt werden kann. Für den Betrieb von Schwimmkranen ist insbesondere die Lastlängsbewegung von Interesse, d.h. die aus der Kopplung der Einzelkörperschwingungen resultierende Relativbewegung, die einen für den Betrieb kritischen Parameter darstellen kann (Kollisionsgefahr Kranausleger-Last). Die Querbewegung stellt einen für die Querstabilität und das Rollverhalten kritischen Parameter dar. Die Elastizität des Lastseiles wird in dem linearisierten Modell vernachlässigt.

Die lineare Bewegungsdifferentialgleichung des Systems Schwimmkran mit hängender Last ergibt sich in Matrixschreibweise zu

$$(\underline{\mathbf{M}} + \underline{\mathbf{A}}) \cdot \ddot{\underline{s}} + (\underline{\mathbf{B}} + \underline{\mathbf{B}}_V + \underline{\mathbf{B}}_{LD}) \cdot \dot{\underline{s}} + \underline{\mathbf{C}} \cdot \underline{s} = \underline{\mathbf{F}}_e \quad (1)$$

mit dem Vektor der Freiheitsgrade von Schwimmkörper und Last

$$\underline{s} = (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, \varphi_1, \varphi_2) \quad (2)$$

und der Kräfte und Momente des erregenden Seegangs

$$\underline{\mathbf{F}}_e = (F_{ex}, F_{ey}, F_{ez}, M_{exx}, M_{eyy}, M_{ezz}, 0, 0). \quad (3)$$

Hierbei ist zu beachten, daß die Vektoren und Matrizen Elemente unterschiedlicher physikalischer

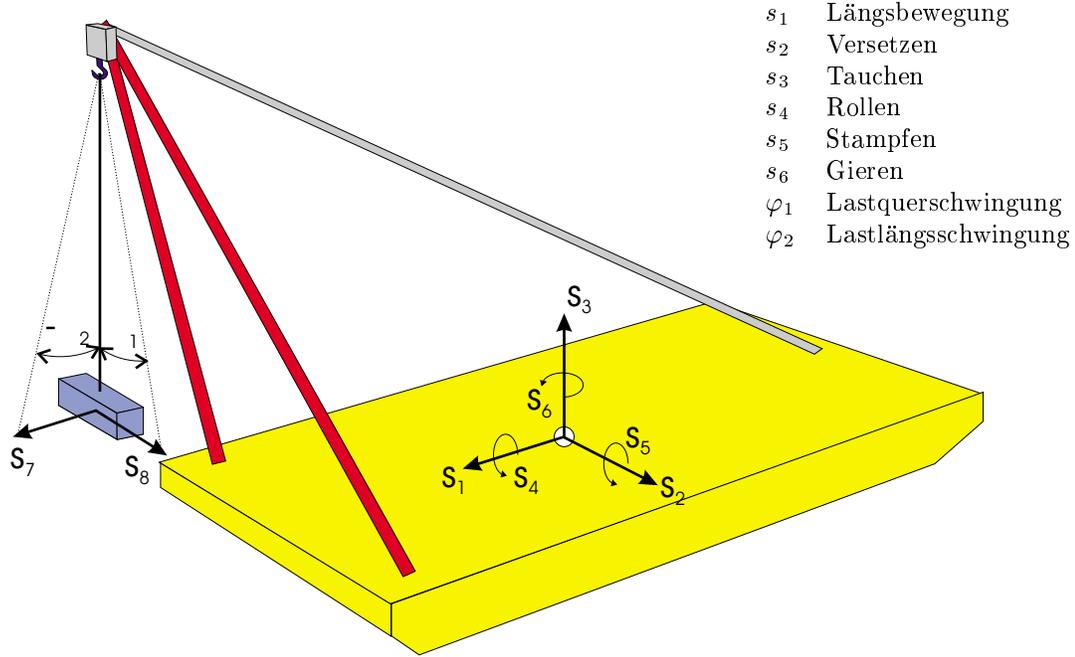


Abb. 5: Koordinatensystem und Freiheitsgrade

Einheiten beinhalten. Die Massenmatrix

$$\underline{\underline{M}} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G & 0 & -m_L l_S \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G & m_L l_S & 0 \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} & -m_L l_S z_N & 0 \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} & 0 & -m_L l_S z_N \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} & m_L l_S x_N & m_L l_S y_N \\ 0 & m_L l_S & 0 & -m_L l_S z_N & 0 & m_L l_S x_N & m_L l_S^2 & 0 \\ -m_L l_S & 0 & 0 & 0 & -m_L l_S z_N & m_L l_S y_N & 0 & m_L l_S^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

beinhaltet die Strukturmasse des Systems sowie die statischen Momente und die axialen Trägheitsmomente. Die Last muß hierbei an der Krannock wirkend angesetzt werden. Die letzten zwei Spalten und Zeilen ergeben sich aus den Parametern der Kran- und Lastkonfiguration mit der Masse der Last m_L , der Seillänge l_S und den Koordinaten der Krannock x_N, y_N, z_N . Der zusätzliche Massenterm - die Matrix $\underline{\underline{A}}$ in Gl. (1) dient der Berücksichtigung der hydrodynamischen Massen. Diese sind eine Folge der Relativbeschleunigungen zwischen dem getauchten Körper und dem umgebenden Wasser und sind sowohl frequenz- als auch richtungsabhängig.

Der geschwindigkeitsproportionale Dämpfungsterm setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

- aus der linearen, frequenzabhängigen Potentialdämpfung $\underline{\underline{B}}$, die den Energieverlust des Schwimmkrans durch die vom schwingenden Fahrzeug abgestrahlten Wellen beschreibt,
- der linearisierten viskosen Dämpfung $\underline{\underline{B}}_V$,
- sowie der Lastdämpfung $\underline{\underline{B}}_{LD}$, die aus inneren Verlusten und durch aktive Dämpfung der Lastbewegung resultieren kann.

Die Steifigkeitsmatrix $\underline{\underline{C}}$ enthält die hydrostatischen Koeffizienten der Tauch-, Roll- und Stampfbewegung, sowie die Koeffizienten der Rückstellkräfte des Pendels und des Verankerungssystems.

Im Fall einer teil- oder vollgetauchten Last sind zusätzliche Änderungen an den Systemparametern zu beachten:

- In der Matrix $\underline{\underline{A}}$ der hydrodynamischen Massen müssen zusätzlich die hydrodynamischen Massen der getauchten Last berücksichtigt werden. Hierbei ist eine Erweiterung aller Elemente der Matrix durchzuführen, nicht nur für die der letzten beiden Reihen bzw. Spalten.
- Die viskose Dämpfung der Last muß der Matrix $\underline{\underline{B}}_{LD}$ hinzugefügt werden.
- Als Folge der Tauchung verringert sich die Kranlast und somit die Rückstellkraft des Pendels. Bei einer teilweisen Tauchung verändert sich die Schwimmwasserlinie und die betroffenen hydrostatischen Koeffizienten der Steifigkeitsmatrix $\underline{\underline{C}}$ müssen der jeweiligen Konfiguration angepaßt werden.
- Für Lasten nahe der Wasseroberfläche müssen gegebenenfalls Wellenkräfte Berücksichtigung finden.

Untersuchungen für den Betrieb bei teil- oder vollgetauchter Last sind für eine Reihe typischer Schwimmkrananwendungen zwingend notwendig — z.B. dem Absetzen von Jackets – können jedoch aufgrund der Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens und der hohen hydrodynamischen Komplexität dieses Falles nicht mit berücksichtigt werden.

Die Bewegungsgleichung (1) wird im Frequenzbereich gelöst und führt auf ein lineares Gleichungssystem

$$\left[(-\underline{\underline{M}} + \underline{\underline{A}}) \cdot \omega^2 - \mathbf{i} \cdot (\underline{\underline{B}} + \underline{\underline{B}}_V + \underline{\underline{B}}_{LD}) \cdot \omega + \underline{\underline{C}} \right] \cdot \underline{\underline{s}}^* = \underline{\underline{F}}_e^* \quad (5)$$

mit den Übertragungsfunktionen der Bewegungen

$$s_j^*(\omega) = \frac{s_{ja}}{\zeta_a} \cdot e^{i\epsilon_j}, \quad j = 1 \dots 8$$

und der Kräfte und Momente

$$F_{ej}^*(\omega) = \frac{(F_{ej})_a}{\zeta_a} \cdot e^{i\gamma_j}, \quad j = 1 \dots 6.$$

Die resultierende komplexe Übertragungsfunktion $s^*(\omega)$ beschreibt das linearisierte Verhalten des Systems Schwimmkran mit hängender Last. Das Gleichungssystem (5) kann im Prinzip leicht gelöst werden, jedoch ist die Bestimmung der frequenzabhängigen Matrizen $\underline{\underline{A}}(\omega)$ und $\underline{\underline{B}}(\omega)$ sowie der komplexen Übertragungsfunktionen $\underline{\underline{F}}_e^*(\omega)$ schwierig und für beliebige Geometrien nur numerisch möglich. Zur Berechnung dieser Parameter wird in diesem Vorhaben das bewährte 3D-Diffraktionsprogramm WAMIT[®] (Newman, 1988) eingesetzt, das auf einer am MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) entwickelten potentialtheoretischen Panelmethode beruht.

3.2 Verankerungen

Verankerte schwimmende Strukturen werden bei Arbeiten auf See durch Systeme von Ankern an ihrem Ort gehalten oder führen durch den Einsatz von Ankerwinden gewünschte Bewegungen aus. Je nach Größe, Einsatzbedingung und Art der Struktur werden unterschiedliche Ankerkonfigurationen verwendet, die sich in erster Linie durch die Anzahl, Größe und Position der Anker unterscheidet. Wirken neben den Ankern keine äußeren Kräfte an der Struktur, so stellt sich eine Gleichgewichtslage ein, bei der die Summe der Kräfte und Momente verschwindet. Diese Lage wird als Ruhelage bezeichnet und alle Auslenkungen beziehen sich auf diese Lage.

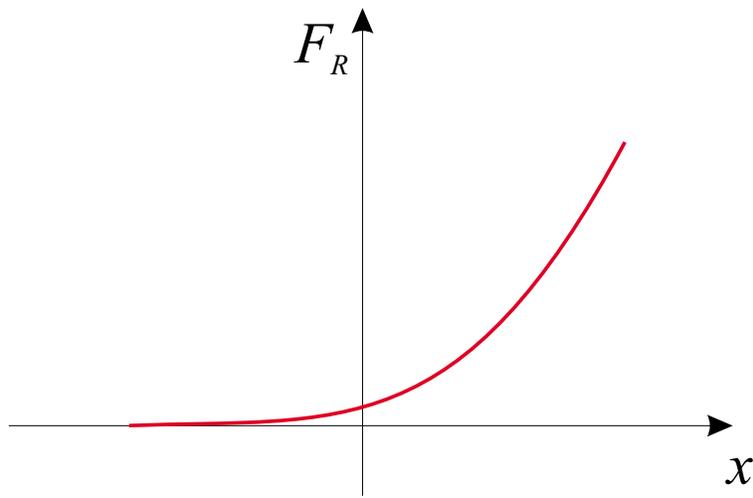


Abb. 6: Verlauf der Rückstellkraft eines einzelnen Ankerstranges

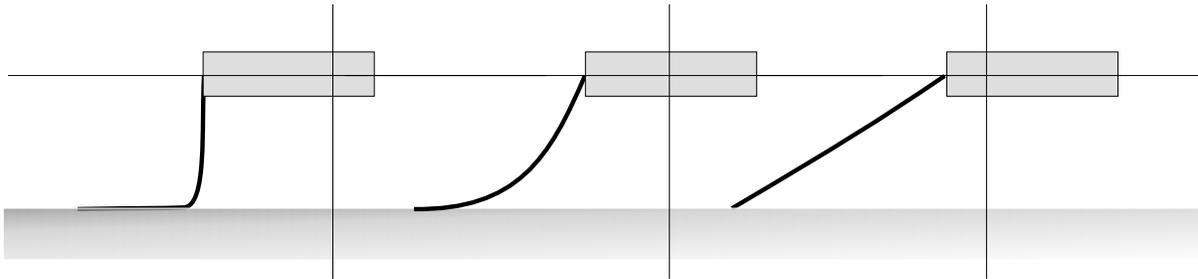


Abb. 7: Grenzen eines einzelnen Ankerstranges

In Abhängigkeit von Wassertiefe, längenspezifischer Dichte der Ankertrosse und ihrer Länge folgt ein Ankerstrang bei Auslenkung einer nichtlinearen, progressiven Rückstellcharakteristik (Abb. 6). Die praktischen Grenzen bezüglich der Auslenkungen sind in Richtung des Ankers durch die vollständig entspannte Ankertrosse, in entgegengesetzter Richtung durch die straff gespannte Trosse oder die Haltekraft des Ankers bzw. der Pfahlgründung gegeben (Abb. 7). Die Charakteristik eines Verankerungssystems – bestehend aus mehreren Ankersträngen in unterschiedliche Richtungen ausgebracht (Abb. 8) – ergibt sich durch Superposition der Einzelkräfte.

Für die mathematische Beschreibung von Verankerungen wurde in früheren Arbeiten ein kubisches Polynom gewählt, bei dem der quadratische Term vernachlässigt wurde (Jiang und Schellin, 1987 und Kreuzer et.al., 1996). Die Rückstellkraft bei Auslenkung in Richtung der Längsachse wird dabei durch

$$F_R(x) = c_1x + c_3x^3 \quad (6)$$

beschrieben.

In diesem Forschungsvorhaben ist der Ansatz aus Gl. (6) um den quadratischen Term erweitert worden. Die Rückstellkraft wird durch das Polynom in der symmetrischen Form

$$F_R(x) = c_1x + c_2x|x| + c_3x^3 \quad (7)$$

definiert.

Verankerungssysteme werden so ausgelegt, daß sie im Bereich der zu erwartenden Auslenkungen eine möglichst lineare Rückstellcharakteristik besitzen. Bei der mathematischen Beschreibung nach Gl. (6) kann bei gegebener Anfangssteifigkeit der weitere Verlauf ausschließlich durch c_3 beeinflusst

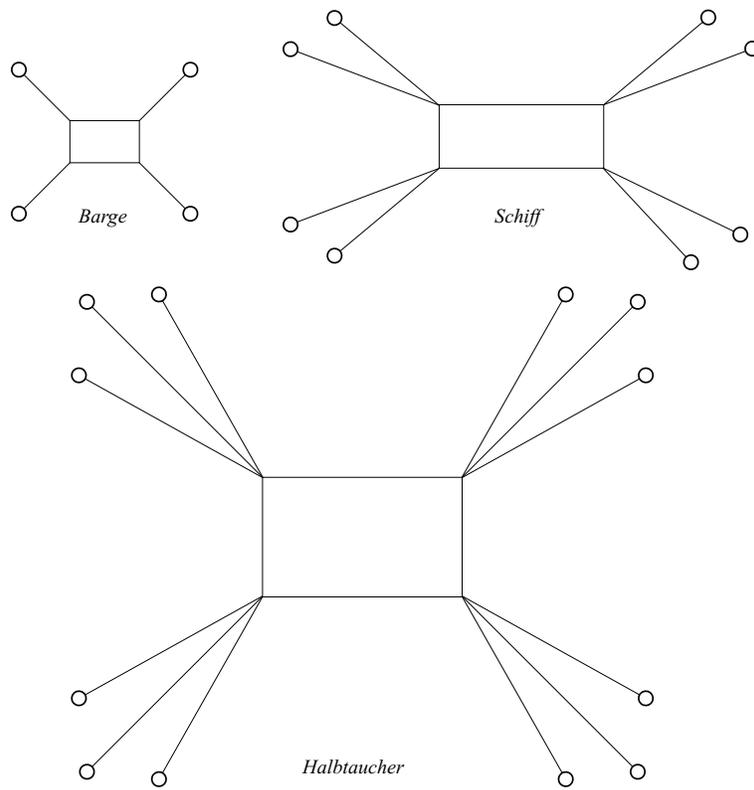


Abb. 8: Verankerungen mit 4, 8 und 12 Ankersträngen

werden. Soll zusätzlich eine bestimmte maximale Rückstellkraft erreicht werden, so ist c_3 ebenfalls festgelegt. Bei Verwendung der Formulierung nach Gl. (7) erhält man zusätzlichen Spielraum um die Charakteristik der Verankerung zu beeinflussen.

In der Bewegungsdifferentialgleichung der numerischen Simulation findet sich die Verankerung in den Koeffizienten der Steifigkeitsmatrix $\underline{\underline{\mathbf{C}}}$ aus Gl. (1) wieder, für die Rückstellkraft in Längsrichtung ist dies der Koeffizient C_{11} . Die Koeffizienten C_{11} , C_{22} und C_{66} sind ausschließlich Parameter der Verankerung, da für diese Freiheitsgrade keine hydrodynamischen Rückstellkräfte bzw. -momente existieren.

4 Versuchseinrichtungen

4.1 Der Wellenkanal

Die Seegangversuche werden im Wellenkanal der TU Berlin durchgeführt. Dieser ist 80 m lang, 4 m breit und wird während der Seegangversuche mit einer Wassertiefe von 1.5 m betrieben. Die Wellen werden von einem in einem Pendelrahmen aufgehängten Wellenblatt erzeugt, welches von einem Hydraulikzylinder über eine Schubstange angetrieben wird. Die maximale Auslenkung des Wellenblattes beträgt 0.4 m. Damit ist die Generierung nahezu beliebiger, hydrodynamisch sinnvoller Wellenzüge (reguläre Wellen, Seegangsspektren und transiente Wellengruppen) im Bereich von $T = 0.6$ s bis 5.0 s möglich. Steuersignale für reguläre Wellen, irreguläre Seegänge und transiente Wellengruppen können im entsprechenden Modellmaßstab am PC generiert werden.

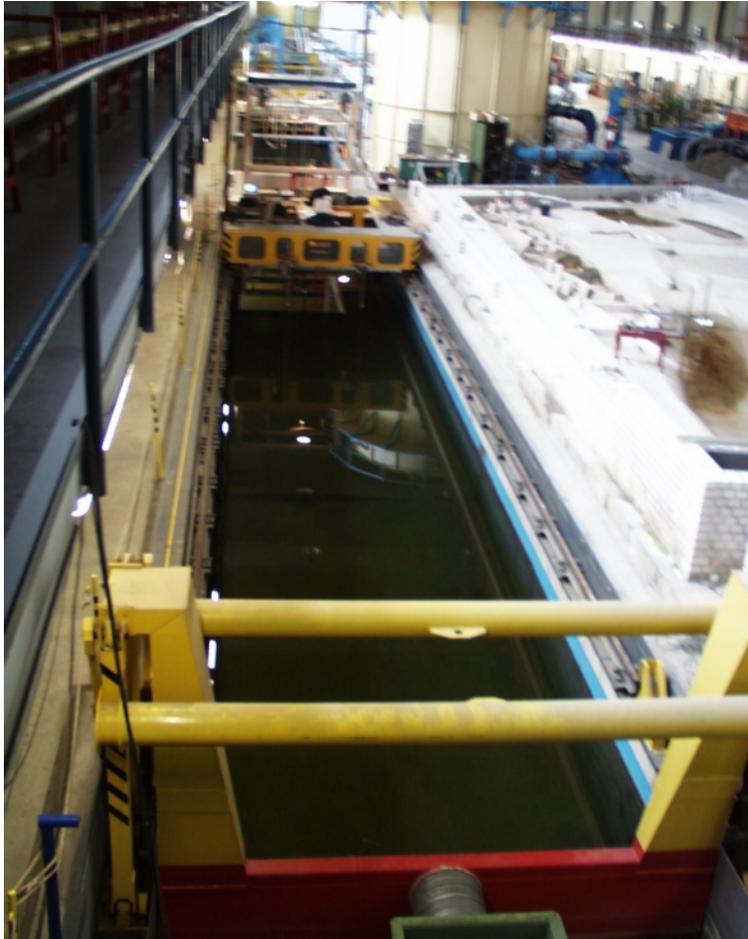


Abb. 9: Wellenkanal der TU Berlin

Am hinteren Ende des Wellenkanals ist eine Böschung installiert, die die Reflektion der Wellen dämpft. Die kreissegmentförmige Böschung wurde speziell für die Frequenzbereiche der zu untersuchenden Seegänge optimiert und macht die in diesem Vorhaben notwendigen langen Meßzeiten erst möglich. Darüberhinaus sind im Bereich der verankerten Schwimmkrane – ca. 20 m von der Wellenmaschine entfernt – Seitenwandabsorber installiert (Abb. 10), die die von den schwingenden Schwimmkranen abgestrahlten Wellen absorbieren. Versuche ohne diese Absorber sind mit den großen Modellen – wie sie in diesem Forschungsvorhaben verwendet wurden – nicht möglich, da die seitlich abgestrahlten Wellen nahezu vollständig reflektiert würden und zu verfälschten Ergebnissen führen würden (Clauss et al., 1992, Chen und Clauss, 1992). Die Seitenwandabsorber bestehen aus

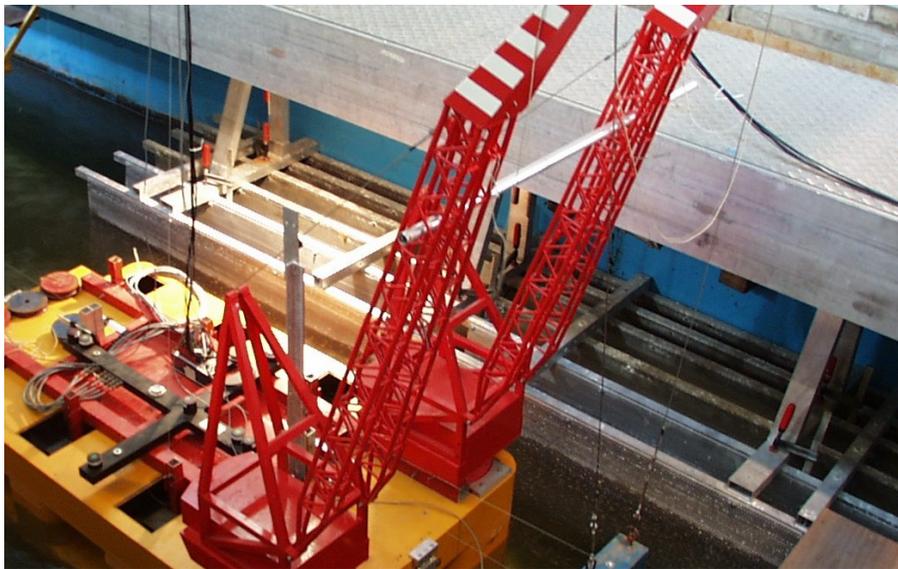


Abb. 10: Seitenwandabsorber im Wellenkanal

vertikal angeordneten Blechen unterschiedlicher Porosität, die in definierten Abständen parallel zur Wand angebracht sind.

Der Schleppwagen wird für die Versuche an der Position der Seitenwandabsorber geparkt und dient dort zum einen als Träger der Meßtechnik, zum anderen werden die Verankerungen und Führungen an ihm befestigt.

Um den hohen Genauigkeitsanforderungen bei der Untersuchung nichtlinearer Effekte gerecht zu werden, mußten die vorhandenen Meßprogramme und Meßinstrumente für das zu bearbeitende Projekt angepaßt und optimiert werden. Während bei Untersuchungen der linearen Schwimmkrandynamik eine Meßrate von 20 Hz ausreichend ist, muß bei der Analyse nichtlinearer Starrkörperbewegungen mit Meßraten von mindestens 100 Hz gemessen werden. Da die hydrodynamische Analyse nichtlinearer Systeme nicht im Frequenz- sondern im Zeitbereich durchgeführt werden muß, sind außerdem lange Meßzeiten sowie Steuerungszeiten für die Wellenmaschine erforderlich. Inertiale Bewegungsmeßverfahren wurden entwickelt, um die dreidimensionalen Starrkörperbewegungen zeitsparend untersuchen zu können.

4.2 Bewegungsmessung

Zur Erfassung des Bewegungsverhaltens von Schwimmkränen mit hängender Last müssen einerseits die Bewegungen des Schwimmkörpers, andererseits die Absolut- oder Relativbewegungen der Last gemessen werden. Die folgenden drei Abschnitte 4.2.1 bis 4.2.3 beschreiben unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Schwimmkörperbewegung, die Abschnitte 4.2.4 und 4.2.5 eingesetzte Methoden zur Erfassung der Pendelbewegung.

4.2.1 Induktive Weggeber

Im Rahmen dieses F&E-Vorhabens wurden in der Regel induktive Weggeber eingesetzt, um die Starrkörperbewegungen zu bestimmen. Zur Ermittlung aller sechs Freiheitsgrade des Schiffskörpers sind sechs Weggeber erforderlich, die durch Fäden mit dem Modell verbunden werden. Abhängig vom Versuchsaufbau werden die Weggeberfäden gegebenenfalls über Umlenkrollen geführt. Da der Meßbereich der Weggeber auf maximal 0.3 m begrenzt ist, sind zur Übertragung großer Bewegun-

gen Untersetzungen notwendig. Dies wird mit Hilfe von kombinierten Umlenkrollen verschiedener Durchmesser realisiert. Zur Minimierung des Widerstandes und der axialen Trägheitsmomente sind besonders leichte, kugelgelagerte Umlenkrollen gefertigt worden.

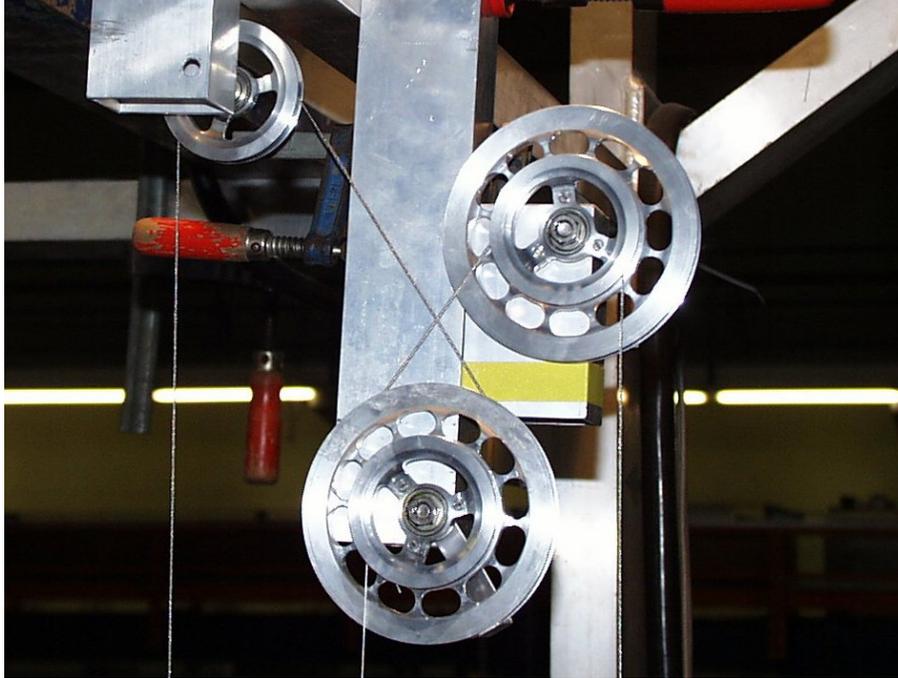


Abb. 11: Umlenkrollen der Verankerung und des Weggebersystems

Drei der Weggeber messen in vertikaler und drei in horizontaler Richtung. Die Starrkörperbewegungen s_j lassen sich durch das folgende nichtlineare Gleichungssystem aus den Weggebersignalen w_j ermitteln:

$$w_1 = s_3 + y_1 s_4 - x_1 s_5 + R_1 \quad (8)$$

$$w_2 = s_3 + y_2 s_4 - x_2 s_5 + R_2 \quad (9)$$

$$w_3 = s_3 + y_3 s_4 - x_3 s_5 + R_3 \quad (10)$$

$$w_4 = s_2 - z_4 s_4 + x_4 s_6 + R_4 \quad (11)$$

$$w_5 = s_2 - z_5 s_4 + x_5 s_6 + R_5 \quad (12)$$

$$w_6 = s_1 + z_6 s_5 - y_6 s_6 + R_6 \quad (13)$$

wobei: w_i Weggebersignale,
 x_i, y_i, z_i Koordinaten der Anschlagpunkte im gewählten Koordinatensystem,
 s_j sechs Starrkörperbewegungen,
 R_i nichtlineare Fehlerglieder.

Das Gleichungssystem wird iterativ gelöst, wobei das Rechenprogramm in der Regel nach 4 Iterationen konvergiert. Hierzu werden die Weggebersignale mit den nichtlinearen Fehlergliedern zusammengefaßt. Das resultierende lineare Gleichungssystem zur Ermittlung von s_j kann analytisch gelöst werden. Zunächst werden s_3, s_4 und s_5 berechnet:

$$s_3 = [wr_1(x_2 y_3 - x_3 y_2) + wr_2(x_3 y_1 - x_1 y_3) + wr_3(x_1 y_2 - x_2 y_1)]/D \quad (14)$$

$$s_4 = [wr_1(x_3 - x_2) + wr_2(x_1 - x_3) + wr_3(x_2 - x_1)]/D \quad (15)$$

$$s_5 = [wr_1(y_3 - y_2) + wr_2(y_1 - y_3) + wr_3(y_2 - y_1)]/D \quad (16)$$

wobei $wr_i = w_i - R_i$ korrigierte Weggebersignale und
 $D = x_1 y_2 + x_2 y_3 + x_3 y_1 - x_1 y_3 - x_2 y_1 - x_3 y_2$

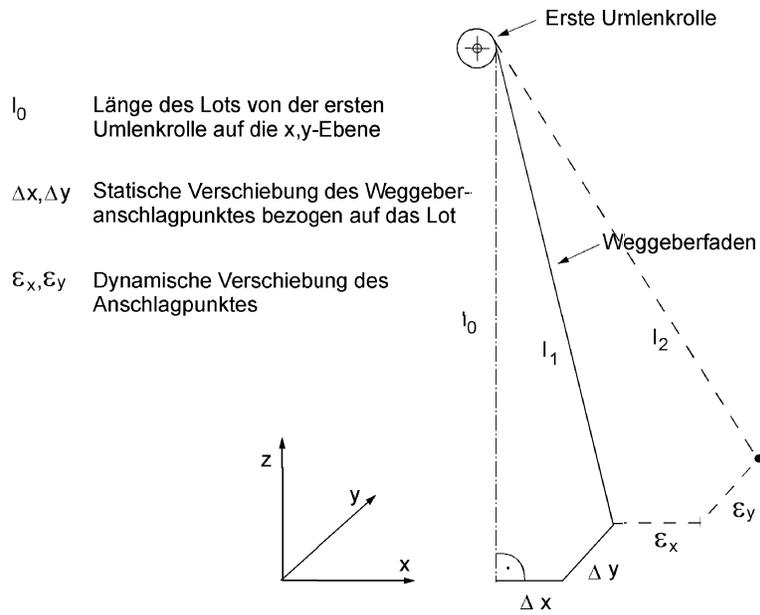


Abb. 12: Fehlerquellen bei der Weggebermessung

die Unterdeterminante der Gleichungen (8) bis (13) ist.

Somit können nun auch s_2 und s_6 bestimmt werden:

$$s_2 = [wr_4x_5 - wr_5x_4 + (x_5z_4 - x_4z_5)s_6] / (x_5 - x_4) \quad (17)$$

$$s_6 = [wr_5 - wr_4 + (z_5 - z_4)s_4] / (x_5 - x_4) \quad (18)$$

und schließlich

$$s_1 = wr_6 - z_6s_5 + y_6s_6. \quad (19)$$

Im ersten Iterationsschritt werden die Fehlerglieder gleich Null gesetzt und so erste Näherungen für die Auslenkungen s_j ermittelt. Aus diesen werden die Fehlerglieder nach Gl. 20 für den zweiten Rechendurchgang bestimmt. Diese sind besonders bei kurzen Fadenlängen zu berücksichtigen, da Bewegungen quer zum Faden entsprechend großen Einfluß auf den Meßfehler haben. Bei den Abweichungen wird zwischen statischen und dynamischen Verschiebungen unterschieden (Abb. 12). Nicht berücksichtigt wird hierbei die Verschiebung in Richtung des Weggeberfadens, dessen Einfluß auf den Fehler jedoch auch bei relativ geringer Länge des Fadens vernachlässigt werden kann. Die Werte l_0 , Δx und Δy werden in der Ruhelage gemessen, während ϵ_x und ϵ_y aus den s_j berechnet werden müssen. Bei den vertikalen Weggebern ergibt sich für $j = 1, 2, 3$:

$$R_j = l_2 - l_1 = l_0^2 + (\epsilon_x + \Delta x)^2 + (\epsilon_y + \Delta y)^2 - l_0^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 \quad (20)$$

Die aus den Starrkörperbewegungen des ersten Rechendurchlaufs ermittelten Fehlergrößen werden von den Weggebermessungen abgezogen. Damit erhält man die Eingabewerte wr_i für den zweiten Durchlauf, aus denen dann mit den Gleichungen (14) bis (19) die korrigierten Bewegungen berechnet werden. Diese Iterationsschleife wird mehrmals durchlaufen, bis der Fehler unter eine angegebene Toleranz gesunken ist. Grundsätzlich ist dieses Meßverfahren sehr genau, allerdings ist der zeitliche Aufwand zur Herstellung des Versuchsaufbaus relativ groß.

Die realistisch modellierten Verankerungskräfte mit dem großen Versatz der Schwimmkrane in Längsrichtung machen den Einsatz mehrerer Übersetzungen des Weggeberfadens zur Registrierung der Längsbewegung notwendig. Der dadurch erhöhte Reibungswiderstand an den Übersetzungen

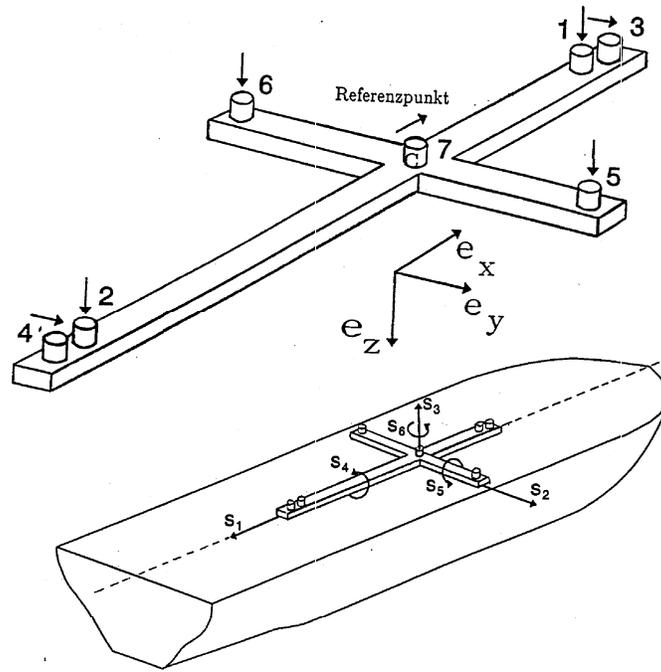


Abb. 13: Beschleunigungsmessrahmen

beeinflusst wiederum die Rückstellkräfte. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieses Projektes zwei neue Meßverfahren untersucht, die berührungslos arbeiten und dadurch auch einen flexiblen Versuchsaufbau versprechen. Diese beiden Inertialmeßverfahren werden im folgenden näher beschrieben.

4.2.2 Beschleunigungsmessrahmen

Miles (1986) beschreibt eine Meßmethode zur Bestimmung von Schiffsmodellbewegungen mit sieben eindimensionalen Beschleunigungsmessern. Der Vorteil dieser Anordnung ist neben der symmetrischen Gewichtsverteilung des Rahmens auch die Möglichkeit, Drehbeschleunigungen für kleine Bewegungen direkt durch ein Paar gegenüberliegender Beschleunigungsmesser zu beschreiben ($[a_1, a_2]$, $[a_3, a_4]$ und $[a_5, a_6]$). Die Sensoren 1, 2, 5 und 6 messen die Beschleunigungen in z -Richtung, 3 und 4 messen in y -Richtung und Beschleunigungsmesser 7 mißt in x -Richtung.

Um die Starrkörperbewegungen s_i (mit $i = 1, 2, \dots, 6$) dieses Systems zu beschreiben, ist es notwendig, die Bewegungsdifferentialgleichungen als Funktion der gemessenen Beschleunigungen darzustellen. Der Beschleunigungsrahmen ist mit dem körperfesten System (x, y, z) fest verbunden und schwingt um eine Gleichgewichtslage, bezogen auf ein raumfestes Koordinatensystem (x_0, y_0, z_0) . Die z_0 -Achse ist nach unten und die x_0 -Achse in Kursrichtung des zu untersuchenden Schwimmkranmodells ausgerichtet. $\mathbf{X}_0(Q)$ ist der Ortsvektor zu einem willkürlich gewählten Punkt auf dem Modell und $\mathbf{r}(CQ)$ der Vektor vom Referenzpunkt C des Rahmens zu Q . Da $\mathbf{r}(CQ)$ zeitlich konstant ist, folgt:

$$\ddot{\mathbf{X}}_0(Q) = \ddot{\mathbf{X}}_0(C) + \ddot{\mathbf{A}} \mathbf{X}_0(CQ) \quad (21)$$

wobei $\ddot{\mathbf{A}}$ die zweite zeitliche Ableitung der Transformationsmatrix \mathbf{A} ist:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ & -\cos \phi \sin \psi & +\sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ & +\cos \theta \cos \psi & -\sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (22)$$

Da die Beschleunigungsmesser je nach Ausrichtung eine entsprechende Komponente des Schwerfeldes der Erde mit registrieren, muß dieser Anteil von den eigentlichen Meßwerten subtrahiert werden um die Relativbeschleunigung zu ermitteln. Die Meßwerte der Beschleunigungsmesser $a_i(t)$, mit $i = 1, 2, \dots, 7$ setzen sich nach Gl. (21) wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} a_1(t) &= \mathbf{e}_z \cdot [\mathbf{A}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_0(\mathbf{C}) - \mathbf{g} \cdot \hat{\mathbf{k}}_0)] - r_1 \mathbf{e}_z \cdot [\mathbf{A}^{-1} \ddot{\mathbf{A}} \mathbf{e}_x] \\ a_2(t) &= \mathbf{e}_z \cdot [\mathbf{A}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_0(\mathbf{C}) - \mathbf{g} \cdot \hat{\mathbf{k}}_0)] + r_2 \mathbf{e}_z \cdot [\mathbf{A}^{-1} \ddot{\mathbf{A}} \mathbf{e}_x] \\ a_3(t) &= \mathbf{e}_y \cdot [\mathbf{A}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_0(\mathbf{C}) - \mathbf{g} \cdot \hat{\mathbf{k}}_0)] + r_3 \mathbf{e}_y \cdot [\mathbf{A}^{-1} \ddot{\mathbf{A}} \mathbf{e}_x] \\ a_4(t) &= \mathbf{e}_y \cdot [\mathbf{A}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_0(\mathbf{C}) - \mathbf{g} \cdot \hat{\mathbf{k}}_0)] - r_4 \mathbf{e}_y \cdot [\mathbf{A}^{-1} \ddot{\mathbf{A}} \mathbf{e}_x] \\ a_5(t) &= \mathbf{e}_z \cdot [\mathbf{A}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_0(\mathbf{C}) - \mathbf{g} \cdot \hat{\mathbf{k}}_0)] + r_5 \mathbf{e}_z \cdot [\mathbf{A}^{-1} \ddot{\mathbf{A}} \mathbf{e}_y] \\ a_6(t) &= \mathbf{e}_z \cdot [\mathbf{A}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_0(\mathbf{C}) - \mathbf{g} \cdot \hat{\mathbf{k}}_0)] - r_6 \mathbf{e}_z \cdot [\mathbf{A}^{-1} \ddot{\mathbf{A}} \mathbf{e}_y] \\ a_7(t) &= \mathbf{e}_x \cdot [\mathbf{A}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_0(\mathbf{C}) - \mathbf{g} \cdot \hat{\mathbf{k}}_0)] \end{aligned} \quad (23)$$

Hierbei sind \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y und \mathbf{e}_z die Einheitsvektoren des körperfesten Koordinatensystems. $\hat{\mathbf{k}}_0$ ist der Einheitsvektor in z_0 -Richtung und r_i die radiale Entfernung des Punktes C vom Beschleunigungsmesser i . Die Winkelbeschleunigungen des körperfesten Systems lassen sich für kleine Auslenkungen durch Subtraktion der Signale je eines Beschleunigungspaares ($[a_1, a_2]$, $[a_3, a_4]$, $[a_5, a_6]$) linear ermitteln:

$$\begin{aligned} f_1(t) &= (a_5 - a_6)/(r_5 + r_6) \\ f_2(t) &= (a_2 - a_1)/(r_1 + r_2) \\ f_3(t) &= (a_3 - a_4)/(r_3 + r_4) \end{aligned} \quad (24)$$

Die Ableitung der Transformationsmatrix \mathbf{A} kann als Produkt von:

$$\dot{\mathbf{A}} = \mathbf{A} \boldsymbol{\Omega} \quad (25)$$

mit:

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

formuliert werden. ω_x , ω_y , ω_z sind die Komponenten des Winkelgeschwindigkeitstensors entlang der Körperachsen. Für Winkelbewegungen innerhalb eines kurzen Zeitintervalls können sie durch die Euler-Winkel beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \phi \\ \omega_y &= \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\psi} \cos \theta \sin \phi \\ \omega_z &= -\dot{\theta} \sin \phi + \dot{\psi} \cos \theta \cos \phi \end{aligned} \quad (27)$$

Aus (25) folgt:

$$\ddot{\mathbf{A}} = \mathbf{A} (\boldsymbol{\Omega}^2 + \dot{\boldsymbol{\Omega}}) \quad (28)$$

Die Winkelbeschleunigungen des Systems können durch:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_x &= f_1(t) - \omega_y \omega_z \\ \dot{\omega}_y &= f_2(t) + \omega_x \omega_z \\ \dot{\omega}_z &= f_3(t) - \omega_x \omega_y\end{aligned}\tag{29}$$

als Funktion der gemessenen Beschleunigungen berechnet werden. Die Euler-Winkel werden aus (28) abgeleitet:

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \omega_x + \tan\theta(\omega_y \sin\phi + \omega_z \cos\phi) \\ \dot{\theta} &= \omega_y + \cos\phi - \omega_z \sin\phi \\ \dot{\psi} &= (\omega_y + \sin\phi + \omega_z \cos\phi)/\cos\theta\end{aligned}\tag{30}$$

Wird Gleichung (21) auf jeden Beschleunigungsgeber mit dem Skalarprodukt des Einheitsvektors der Meßachse des jeweiligen Beschleunigungsmessers angewandt, folgt:

$$\ddot{\mathbf{X}}_0(C) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P} + g \hat{\mathbf{k}}_0\tag{31}$$

wobei sich die Komponenten des Vektors \mathbf{P} folgendermaßen ergeben:

$$P_1(t) = a_7\tag{32}$$

$$P_2(t) = (R_4 a_7 + R_3 a_4)/(R_3 + R_4)\tag{33}$$

$$P_3(t) = (R_2 a_1 + R_1 a_2)/(R_1 + R_2)\tag{34}$$

Gleichung (31) gibt die translatorischen Beschleunigungen des Punktes C als Funktion des gemessenen Vektors \mathbf{P} und des Transformationstensors \mathbf{A} an. Das Gleichungssystem (29) muß zuerst numerisch gelöst werden, um ω_x , ω_y , ω_z zu erhalten. Anschließend wird das Gleichungssystem (27) für ϕ , θ und ψ durch Integration gelöst. Damit ist der Transformationstensor \mathbf{A} bestimmt, wodurch die Gleichung (31) integriert und somit die translatorischen Bewegungen ermittelt werden können.

4.2.3 Lagereferenzsystem

Im Rahmen des Projektes wurde ein inertiales Meßsystem entwickelt und gebaut, das zusätzlich neben dem Weggebersystem und dem Miles-Beschleunigungsrahmen für die Ermittlung der Starrkörperbewegungen des Schwimmkörpers eingesetzt wurde. Das entwickelte System basiert auf drei in den Koordinatenhauptebenen installierten faseroptischen Kreiseln zur Erfassung der rotatorischen Beschleunigungen und je einem achsparallel angeordneten linearen Beschleunigungsgeber zur Registrierung der translatorischen Beschleunigungen.

Da sowohl die Kreisel als auch die Beschleunigungsmesser im körperfesten System messen (Strapdown-Verfahren), muß bei der Transformation in das raumfeste Koordinatensystem beachtet werden, daß sich die Geschwindigkeit $\mathbf{v}(t)$ eines beliebigen materiellen Punktes X (Ort der Meßsensorik) am Schiffskörper (Abb. 15 und 16) – bezüglich einer bewegten Basis, deren Ursprung mit dem Schwerpunkt des starren Systems identisch ist – aus folgenden Anteilen zusammensetzt:

- Translationsgeschwindigkeit der körperfesten Basis (z.B. Gewichtsschwerpunkt) gegenüber dem raumfesten System:

$$\dot{\mathbf{c}}(t) = \mathbf{v}_p(t)\tag{35}$$

wobei $\mathbf{c}(t)$ die Koordinaten des Schwerpunktes im raumfesten System beinhaltet.

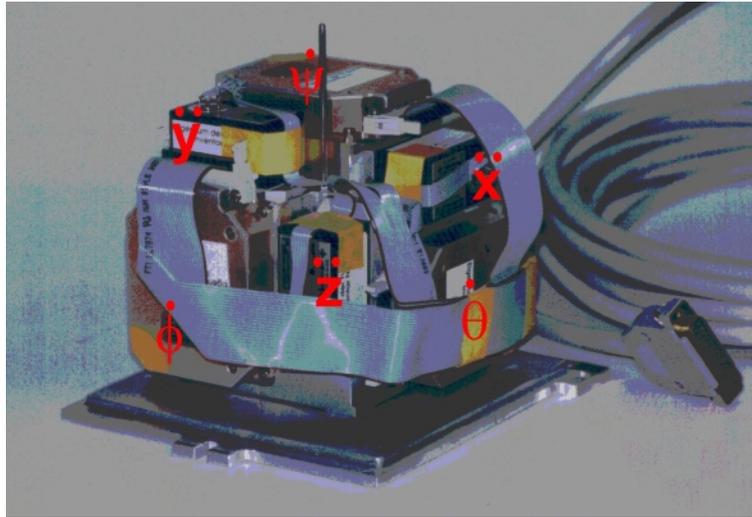


Abb. 14: Lagereferenzsystem

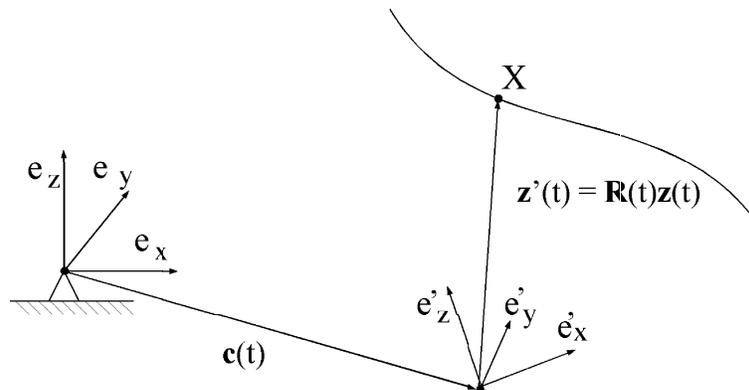


Abb. 15: Raumfestes und körperfestes Koordinatensystem

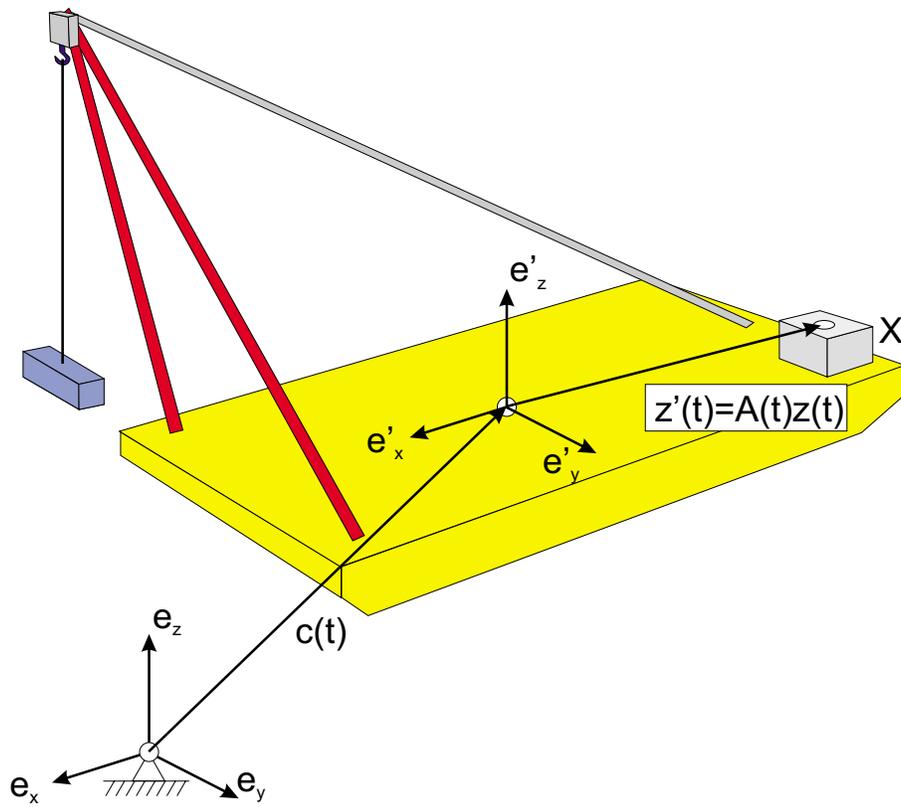


Abb. 16: Koordinatensysteme an der Kranbarge

- Relativgeschwindigkeit des Punktes X gegenüber der bewegten Basis:

$$\dot{\mathbf{z}}'(t) = \mathbf{v}_{rel}(t) \quad (36)$$

mit \mathbf{z}' als Vektor vom Ursprung des bewegten Systems zum Punkt X . Dieser kann über folgende Beziehung im raumfesten System dargestellt werden:

$$\mathbf{z}'(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{z}(t) \quad (37)$$

wobei $\mathbf{z}(t)$ der Ortsvektor von X im raumfesten System ist. $\mathbf{A}(t)$ ist die Transformationsmatrix bzw. der Drehtensor aus (22), der die Drehung des bewegten Systems gegenüber dem raumfesten System zu jeder Zeit t durch die Euler-Winkel beschreibt.

- Rotationsgeschwindigkeit als zeitliche Richtungsableitung des Vektors $\mathbf{z}'(t)$ bei der Systemdrehung mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$:

$$\omega(t) \times \mathbf{z}'(t) = \mathbf{\Omega}(t)\mathbf{z}'(t) \quad (38)$$

mit $\mathbf{\Omega}(t)$ als Drehgeschwindigkeitstensor

$$\mathbf{\Omega}(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3(t) & \omega_2(t) \\ \omega_3(t) & 0 & -\omega_1(t) \\ -\omega_2(t) & \omega_1(t) & 0 \end{pmatrix} \quad (39)$$

Dieser läßt sich aus dem Drehtensor $\mathbf{A}(t)$ herleiten.

$$\mathbf{\Omega}(t) = \dot{\mathbf{A}}(t)\mathbf{A}^T(t) \quad (40)$$

Somit resultiert die Gesamtgeschwindigkeit des materiellen Punktes X , bezogen auf das raumfeste System in:

$$\mathbf{v}(t) = \dot{\mathbf{c}}(t) + \dot{\mathbf{z}}'(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{z}'(t) = \dot{\mathbf{c}}(t) + \mathbf{v}'(t) + \boldsymbol{\Omega}(t)\mathbf{z}'(t) \quad (41)$$

Von den Geschwindigkeitstermen am Punkt X können die entsprechenden Beschleunigungsanteile abgeleitet werden. Entsprechend ergibt sich die Beschleunigung $\mathbf{a}(t)$ des Punktes X bezüglich einer bewegten Basis, deren Ursprung mit dem Schwerpunkt des Starrkörpers identisch ist, aus folgenden Komponenten:

- Translationsbeschleunigung des Ursprunges der bewegten Basis:

$$\ddot{\mathbf{c}}(t) = \mathbf{a}_p(t) \quad (42)$$

- Relativbeschleunigung von X gegenüber der bewegten Basis:

$$\ddot{\mathbf{z}}'(t) = \mathbf{a}_{rel}(t) \quad (43)$$

- Coriolis-Beschleunigung:

$$2\boldsymbol{\omega}(t) \times \dot{\mathbf{z}}'(t) = 2\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{v}_{rel}(t) \quad (44)$$

- Rotationsbeschleunigung:

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}(t) \times \mathbf{z}'(t) = \dot{\boldsymbol{\Omega}}(t)\mathbf{z}'(t) \quad (45)$$

- Zentripetalbeschleunigung:

$$\boldsymbol{\omega}(t) \times (\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{z}'(t)) = \boldsymbol{\omega}(t) \times (\boldsymbol{\Omega}(t)\mathbf{z}'(t)) = \boldsymbol{\Omega}(t) (\boldsymbol{\Omega}(t)\mathbf{z}'(t)) \quad (46)$$

Für die Gesamtbeschleunigung des Punktes X , bezogen auf das raumfeste System, ergibt sich somit:

$$\mathbf{a}(t) = \mathbf{a}_p(t) + \ddot{\mathbf{z}}'(t) + 2\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{v}_{rel}(t) + \dot{\boldsymbol{\Omega}}(t)\mathbf{z}'(t) + \boldsymbol{\Omega}(t) (\boldsymbol{\Omega}(t)\mathbf{z}'(t)) \quad (47)$$

Die Meßsensorik ist fest mit dem Schiffskörper verbunden. Somit ist $\mathbf{z}'(t) = \text{konst}$ und $\dot{\mathbf{z}}'(t) = 0$, wodurch die beiden Terme für die Relativbeschleunigung und die Coriolis-Beschleunigung entfallen. So reduziert sich die Beschleunigung des Punktes X zu:

$$\mathbf{a}(t) = \mathbf{a}_p(t) + \dot{\boldsymbol{\Omega}}(t)\mathbf{z}'(t) + \boldsymbol{\Omega}(t) (\boldsymbol{\Omega}(t)\mathbf{z}') \quad (48)$$

$\mathbf{a}_p(t)$ sind die gesuchten translatorischen Beschleunigungen des Schiffsschwerpunktes. Mit den Kreiseln wird die Änderung der Winkellage gemessen. Aus diesen Winkeländerungen wird der Drehtensor $\mathbf{A}(t)$ sowie der Drehgeschwindigkeitstensor $\boldsymbol{\Omega}$ ermittelt. Die Beschleunigungsmesser registrieren die Gesamtbeschleunigung $\mathbf{a}_m(t)$ im körperfesten Koordinatensystem, so daß sie über den Drehtensors $\mathbf{A}(t)$ in das raumfeste System transformiert werden müssen:

$$\mathbf{a}(t) = \mathbf{A} \mathbf{a}_m(t) \quad (49)$$

Von den so ermittelten Gesamtbeschleunigungen werden die dynamischen Anteile, d.h. die Rotations- und Zentripetalbeschleunigung sowie der statische Anteil des Gravitationsfeldes, abgezogen:

$$\mathbf{a}_p(t) = \mathbf{a}(t) - \dot{\boldsymbol{\Omega}}(t)\mathbf{z}'(t) + \boldsymbol{\Omega}(t) (\boldsymbol{\Omega}(t)\mathbf{z}') \quad (50)$$

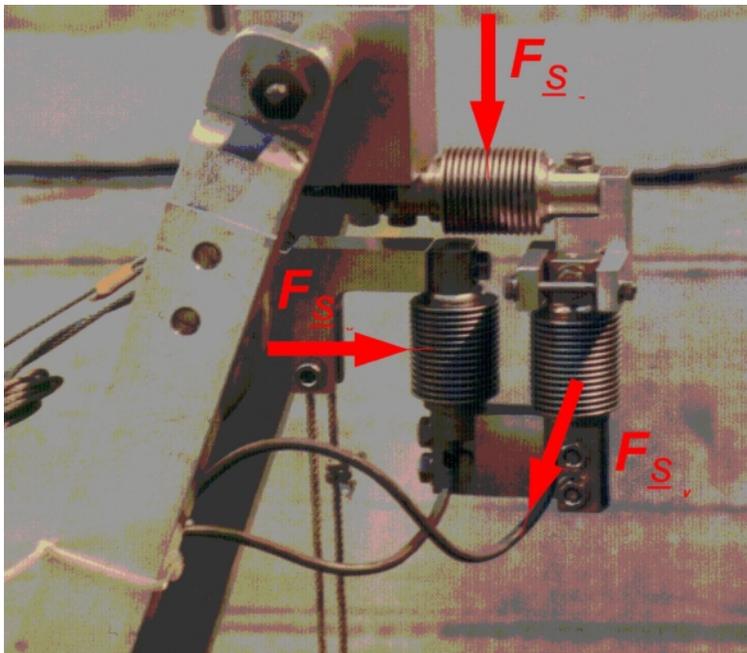


Abb. 17: Dreikomponentenwaage an der Krannock

4.2.4 Bestimmung der Pendelbewegung der Last mit Hilfe der Seilkraft

Mit Hilfe einer Dreikomponentenwaage, die an der Krannock starr mit dem Ausleger verbunden ist (Abb. 17), werden die Komponenten der Seilkraft gemessen. Da die Kraft ausschließlich in Seilrichtung übertragen wird, kann mit einem linearisierten Ansatz aus den Kraftkomponenten (F_{Sx} , F_{Sy} , F_{Sz}) die Bewegungen der Last berechnet werden:

$$s_{7_{rel}} = \frac{F_{Sx}}{F_{Sz}} \cdot l_s, \quad (51)$$

$$s_{8_{rel}} = \frac{F_{Sy}}{F_{Sz}} \cdot l_s. \quad (52)$$

Da die Waage starr mit dem Kranausleger verbunden ist, werden die Winkel gegenüber dem Schiff und nicht die Winkel gegenüber dem raumfesten Koordinatensystem berechnet. Um die absoluten Lastbewegungen zu ermitteln, müssen den Relativbewegungen die Starrkörperbewegungen des Schiffkörpers überlagert werden. Für die drei Absolutbewegungen ergeben sich somit unter Vernachlässigung der elastischen Dehnung des Seils:

$$s_7 = s_1 + s_5 \cdot (z_N - l_S) - s_6 \cdot y_N + s_{7_{rel}} \quad (53)$$

$$s_8 = s_2 - s_4 \cdot (z_N - l_S) + s_6 \cdot x_N + s_{8_{rel}} \quad (54)$$

$$s_9 = s_3 + s_4 \cdot y_N - s_5 \cdot x_N. \quad (55)$$

Der durch die Linearisierung hervorgerufene Fehler liegt bei einem für praktische Erwägungen ausreichend großen maximalen Pendelwinkel (vergleiche Abschnitt 4.2.5) von $\pm 5^\circ$ bei $\varepsilon_{max} = 0.011\%$.

4.2.5 Bestimmung der Pendelbewegung der Last mit induktiven Weggebern

Zur Bestimmung der Lastbewegung bei den Versuchen mit dem Halbttaucher wurde ein induktiver Weggeber eingesetzt, der die relative Bewegung der Last zum Rumpf registriert. Da der Halbttaucher THIALF im Gegensatz zur Kranbarge und dem Kranschiff mit zwei Kranen ausgestattet

ist, ist die Methode der Bestimmung über die Seilkraft mit einem zu hohen Aufwand verbunden. Aufgrund der untersuchten Seillängen l_s zwischen 1.4 m und 1.9 m und einer Installation des Weggebers in genügendem Abstand zur schwingenden Last (Abb. 18), kann auf eine Fehlerkorrektur der Lastbewegung verzichtet werden, wie im Folgenden gezeigt wird.

Mit der Länge des Lastseiles $l_s = 1.8 \text{ m}$, einem Abstand Weggeber/Last von $l_0 = 1.2 \text{ m}$ und einer zulässigen maximalen Auslenkung von $\varphi_{max} = \pm 5^\circ$ ergibt sich durch

$$\Delta x = l_s \cdot \sin(\varphi_{max}) \quad (56)$$

die tatsächliche Auslenkung der Last in x -Richtung. Unter Berücksichtigung der Auslenkung in z -Richtung, gegeben durch

$$\Delta z = l_s \cdot (1 - \cos(\varphi_{max})) \quad (57)$$

ergibt sich ein maximaler relativer Fehler

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta l - \Delta x}{\Delta x} \quad (58)$$

Dabei ist Δl die vom Weggeber gemessene Längenänderung, die über den Betrag des Vektors Weggeberrolle - Last bestimmt werden kann.

$$\Delta l = \sqrt{(l_0 + \Delta x)^2 + \Delta y^2} - l_0 \quad (59)$$

Für den zulässigen Pendelwinkel von $\pm 5^\circ$ ergibt sich bei der gewählten Konfiguration des Versuchsaufbaus ein maximaler Fehler von $\varepsilon_{max} = -0.015\%$. Die Auslenkung der Last bei diesen Pendelwinkeln beträgt mehr als 0.15 m – also über 11 m bei der Großausführung – und liegt somit weit über den realistisch zulässigen Auslenkungen. Der ermittelte maximale Fehler erlaubt eine Verwendung der gemessenen Werte ohne Korrekturen, da der Fehler auch bei Ausnutzung des gesamten Meßbereiches (100%) der 12-Bit Meßkarte noch deutlich unter dem numerischen Fehler der Meßtechnik liegt, siehe Gl. 60.

$$\varepsilon_{numerisch} = \frac{100\%}{2^{12}} = 0.024\% \quad (60)$$

4.3 Verankerungskräfte

Beim Germanischen Lloyd wurde – für die drei zu untersuchenden Schwimmkrantypen – die statische Rückstellkraftcharakteristik für verschiedene Ankerkonfigurationen vorgegeben. Für die Untersuchungen der Schwimmkrane in diesem Forschungsvorhaben sind Verankerungssysteme entwickelt worden, die in ihrer Charakteristik den vom Germanischen Lloyd vorgegebenen Systemen entsprechen.

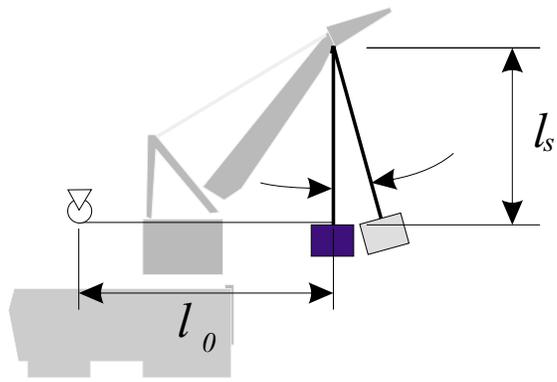


Abb. 18: Lastbewegungsmessung

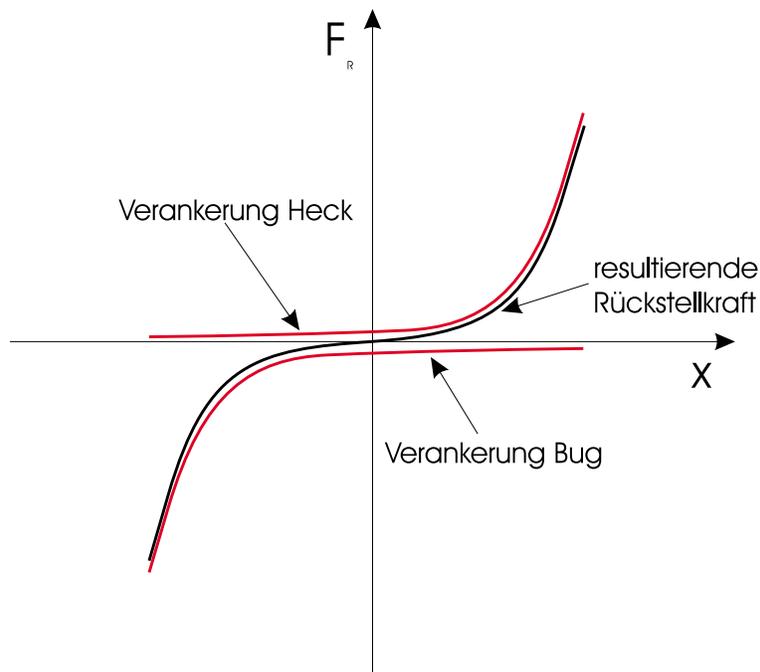


Abb. 19: Resultierende Rückstellkraft für ein Verankerungssystem mit Bug- und Hecktrosse

Verankerungssysteme werden so ausgelegt, daß sie im Bereich der zu erwartenden Auslenkungen eine lineare Rückstellcharakteristik besitzen. Starke kurzzeitige Belastungen – wie unerwartet hohe Wellen oder Stöße von Versorgungern – können dazu führen, daß die Struktur über den Bereich der linearen Rückstellkräfte hinaus versetzt wird und extreme Bewegungsformen auftreten, die auf die Nichtlinearität der Verankerung zurückzuführen sind.

4.3.1 Verankerungscharakteristik

Ausgehend von einem zweidimensionalen Modell mit je einer Verankerung an Bug und Heck ergibt sich für eine verankerte Struktur, die in Richtung ihrer Schiffslängsachse ausgelenkt wird, qualitativ eine Verankerungscharakteristik, wie in Abb. 19 dargestellt.

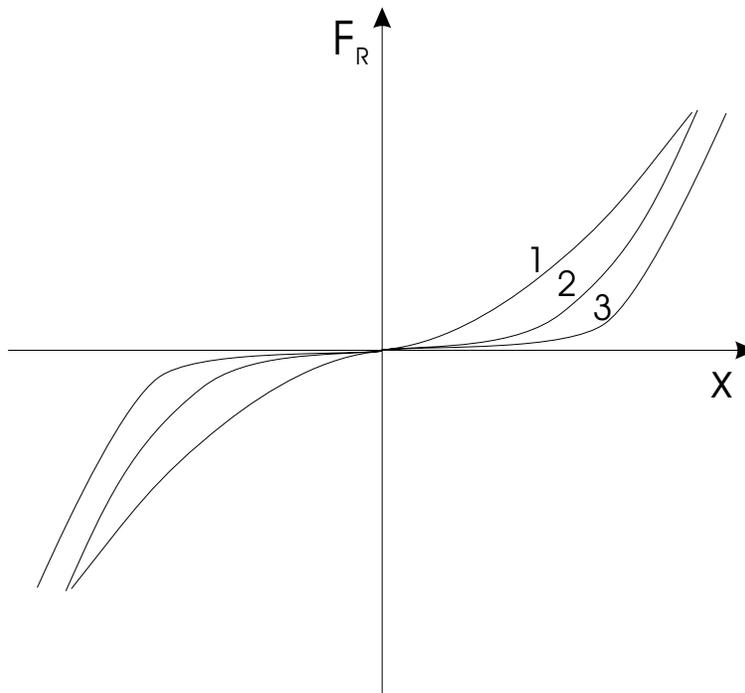


Abb. 20: Verschiedene Rückstellcharakteristiken

Typische Merkmale einer Verankerung sind ein ausgeprägter linearer Abschnitt bei geringen Auslenkungen, gefolgt von einem stark nichtlinearen Teil mit sehr großer Steigung. Der Verlauf der Rückstellkraft wird maßgeblich von den Verankerungsparametern Wassertiefe, längenspezifischem Seilgewicht in Wasser und Seillänge beeinflusst. Typische Verankerungskennlinien sind in Abb. 20 dargestellt.

Im numerischen Modell erfolgt die mathematische Beschreibung der Rückstellkräfte entsprechend der vom Germanischen Lloyd vorgegebenen Methode mit Polynomen dritten Grades, siehe Gl. (7). Diese dienen auch als Grundlage für den Entwurf der Verankerungsmechanik. Die Beschreibung der Verankerungskraft mit kubischen Polynomen ist immer unter Berücksichtigung der physikalischen Gegebenheiten zu betrachten. Innerhalb des Definitionsbereiches muß der Verlauf der Rückstellcharakteristik in jedem Fall monoton steigend sein.

4.3.2 Entwurf der Nichtlinearen Verankerung

Da sich bei der experimentellen Validierung der numerischen Simulation jeweils identische Rückstellkräfte einstellen müssen, ergeben sich für die verwendete Verankerungsmechanik folgende Forderungen:

- gute Übereinstimmung der Rückstellkraft innerhalb des Operationsbereiches,
- geringe Reibung,
- geringe Trägheitskräfte und
- schwingungsarm

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden zwei unterschiedliche Prinzipien der Ankerkraftmodellierung verwendet, die im folgenden beschrieben werden.

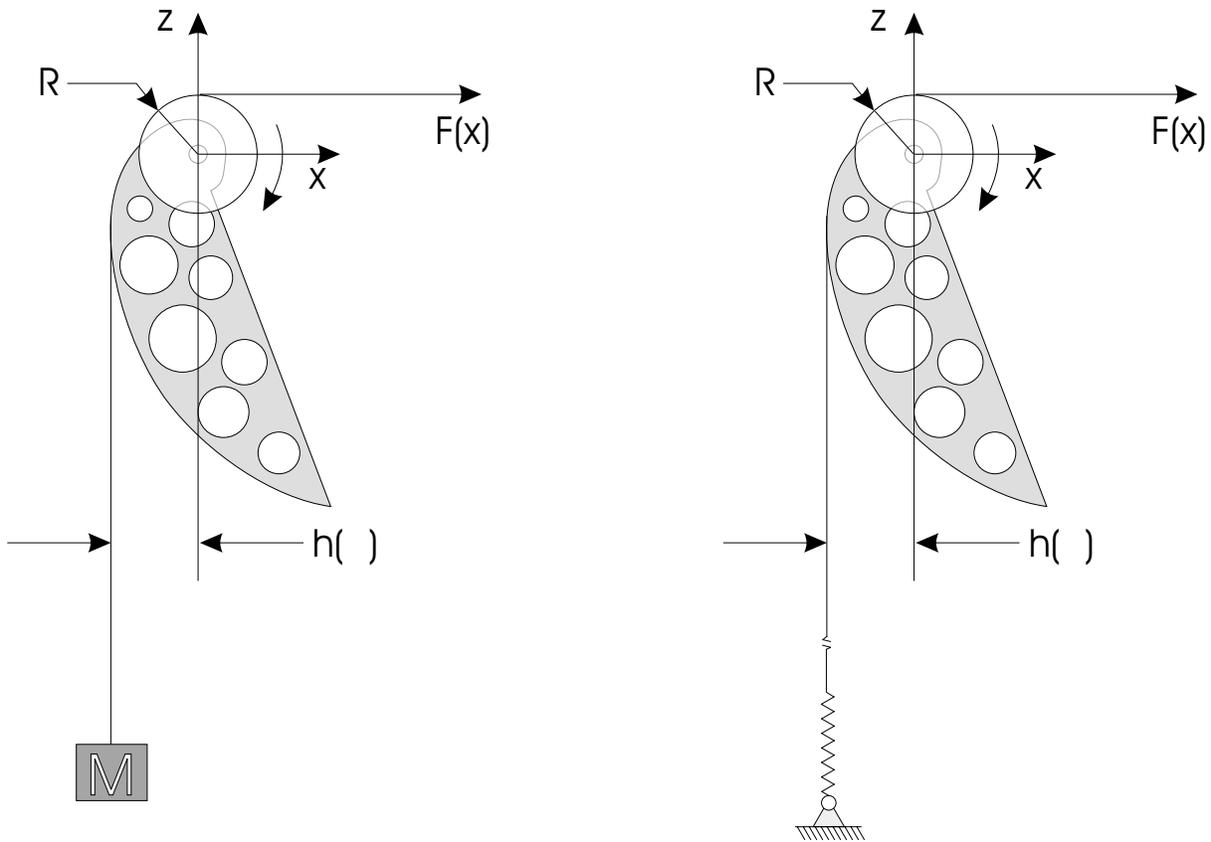


Abb. 21: Nichtlineare Verankerungen mit Nocken

- *Verankerung mit Nocken und Federn*

Zur Erzeugung nichtlinearer Kraftverläufe sind in der ersten Phase des Projektes Nocken verwendet worden, die in Kombination mit Gewichten oder Federn eingesetzt werden (Abb. 21). Das Prinzip beruht auf einem sich mit dem Drehwinkel der Nocke verändernden wirksamen Radius $h(\varphi)$, an dem ein Gewicht wirkt (Ellermann, 1998). Der Entwurf der Nocken erfolgt graphisch durch Erzeugung eines Splines als Funktion der Hebelarme über dem Drehwinkel. Als Nebenbedingung muß die Tangentenbedingung am Ort des Hebelarmes eingehalten werden, was einen begrenzten Umfang der Nichtlinearität zur Folge hat. In Abb. 22 sind drei Verdrehwinkel φ_i der Nocke, resultierend aus den gewünschten Auslenkungen x_i mit den gewünschten effektiven Hebelarmen h_i , abgetragen.

Für den Entwurf der Nockengeometrie unter Verwendung einer Zugfeder sind zusätzliche Parameter und eine modifizierte Tangentenbedingung zu beachten. Da die Feder an einem festen Ort gelagert wird, sind die Tangenten nicht parallel zur z-Achse, sondern laufen in dem Befestigungspunkt der Feder zusammen. Vorspannung und Federkonstante sind weitere Parameter, die beim Entwurf der Nocken zu berücksichtigen sind und bei der Installation der Verankerung entsprechend der Vorgaben eingestellt werden müssen. Die Verankerungen werden auf geometrisch gleichen Trägern separat installiert und für die vorgesehenen Messungen kalibriert. Phase der Nocke und Vorspannung der Feder beider Systeme können so im direkten Vergleich aufeinander abgestimmt werden. Anschließend werden die Träger am Schleppwagen installiert und mit dem zu untersuchenden Schwimmkran verbunden.

- *Verankerung mit Ketten und Federn*

Alternativ zu den Verankerungen mit Nocken ist ein Federmechanismus entwickelt worden, der insbesondere bei großen Auslenkungen sowie Kennlinien mit geringer Anfangs- und hoher End-

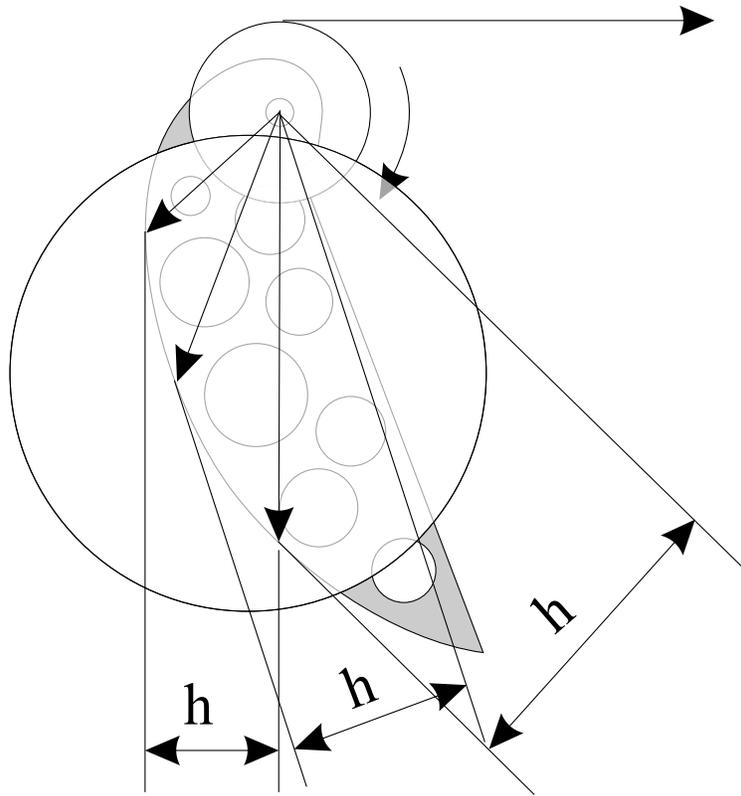


Abb. 22: Entwurf der Nockengeometrie

steifigkeit Vorteile bietet. Ein Beispiel für eine derartige Kennlinie ist in Abb. 20 (Kennlinie 3) dargestellt. Der Verankerungsmechanismus besteht aus zwei Komponenten - einem linearen und einem nichtlinearen Anteil. Der lineare Anteil wird über eine Bleikette erzeugt, die direkt über eine Rolle mit der Bewegung des Schwimmkranes gekoppelt ist und dessen Rückstellkraft durch geeignete Kombination mehrerer Stränge mit unterschiedlichem längenspezifischen Gewicht eingestellt werden kann. Der nichtlineare Anteil der Rückstellkraft wird durch quer zur Surgebewegung angeordnete Federn erzeugt, die über Mitnehmer auf dem Verankerungsseil bei definierter Auslenkung des Schwimmkranes zusätzlich zur linearen Rückstellkraft wirken (Abb. 23). Die Charakteristik der wirksamen Rückstellkraft des nichtlinearen Anteils entspricht

- für $|x| < x_V$

$$F_R(x) = m_K g x \quad (61)$$

- für $|x| \geq x_V$

$$F_R(x) = m_K g x + \left[1 - \frac{B^2}{\sqrt{4(x - x_V)^2 + B^2}} \right] (x - x_V)^2 c_F \quad (62)$$

Hierbei sind $c_F[\frac{N}{m}]$ die Federkonstante der querliegenden Federn, $x_V[m]$ der Vorlauf des Stoppers von der Ruhelage zur Mitnehmerbuchse (entsprechend der Länge des linearen Teils), $B[m]$ die Breite und $m_K[\frac{kg}{m}]$ die längenspezifische Masse der Bleikette. Zur Erfüllung der Rückstellcharakteristik aus Gl. (62) dürfen die Federn nicht vorgespannt werden. Durch diese Verankerungsart konnte eine deutliche Verbesserung der Symmetrieeigenschaften der Verankerungscharakteristik erzielt werden, was für die gute Übereinstimmung zwischen Experiment und numerischer Simulation angestrebt wurde.

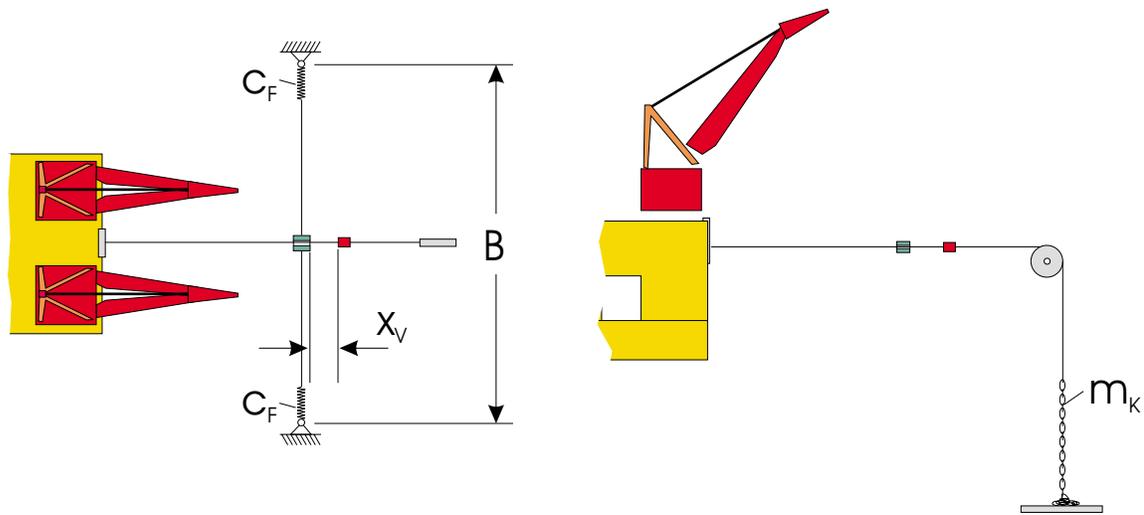


Abb. 23: Parameter der Verankerung

4.4 Schwimmkranmodelle

4.4.1 Kranbarge *MAGNUS*

Das Modell der Kranbarge *MAGNUS* ist im Maßstab 1:25 aus Aluminiumblechen gefertigt (Abb. 24). Der untersuchte Typ besitzt in der Großversion eine Krankapazität von 500 t bei einer Verdrängung von 2060 t. Das Lastseil wird über einen A-Rahmen geführt und ermöglicht eine Hubhöhe von maximal 50 m. Die Lastbewegungen werden über die in Abschnitt 4.2.4 beschriebene Methode mit einer Dreikomponentenwaage ermittelt. Für die Untersuchungen ist die Barge mit Beschlägen in der Mittschiffsebene an Bug und Heck ausgestattet worden, an denen die Verankerungsseile mit den Kraftmeßwaagen installiert werden. Als Verankerungsseile werden 1,5 mm Drahtlitzen aus nichtrostendem Stahl verwendet. Durch das geringe laengenspezifische Gewicht können die Massenkräfte der Verankerungsseile innerhalb der Kräftebilanz vernachlässigt werden. Die notwendige Meßtechnik wird vor dem Austrimmen des Schwimmkranes installiert und die Systemmatrizen des leer vermessenen Kranes werden um die dadurch entstehenden zusätzlichen Massen- und Trägheitsterme korrigiert. Die Zuleitung der Messkabel wird bordseitig durchgeführt und ein zentraler Kabelbaum führt – zur Minimierung äußerer Kräfte – von der Barge senkrecht zu einem Träger des Schleppwagens.

Die Kranbarge hat von allen untersuchten Systemen die größte relative Hubkapazität und ermöglicht sehr intensive Untersuchungen der Einflüsse verschiedener Betriebsparameter. Durch die – entsprechend einer Modellähnlichkeit nach Froude modellierten (Maddox, 1972) – Verankerungskräfte wird das Modell ausreichend genau in der Ursprungsebene gehalten und führt nur Bewegungen in den Freiheitsgraden Tauchen, Stampfen und Längsversatz durch, wie es zur Validierung der numerischen Simulation vorgesehen ist. Zusätzliche Verankerungen oder Führungen sind nicht notwendig.

4.4.2 Kranschiff *CASTORO OTTO*

Das Kranschiff ist ein Modell des 1974 als *E.T.P.M 1601* von Blohm + Voss abgelieferten Kran- und Rohrlegeschiffes. Das aus Holz gefertigte Modell besitzt einen sehr leichten Rumpf und wird mit ca. 84 kg am Boden angeordneten Gewichten auf seine Betriebsverdrängung von 130 kg ballastiert, was einer Verdrängung von ca. 56200 t der Großausführung entspricht. Aufgrund des geringen Breitenträgheitsmomentes der Schwimmwasserlinie und der hohen Schwerpunktlage des Kranes ist die

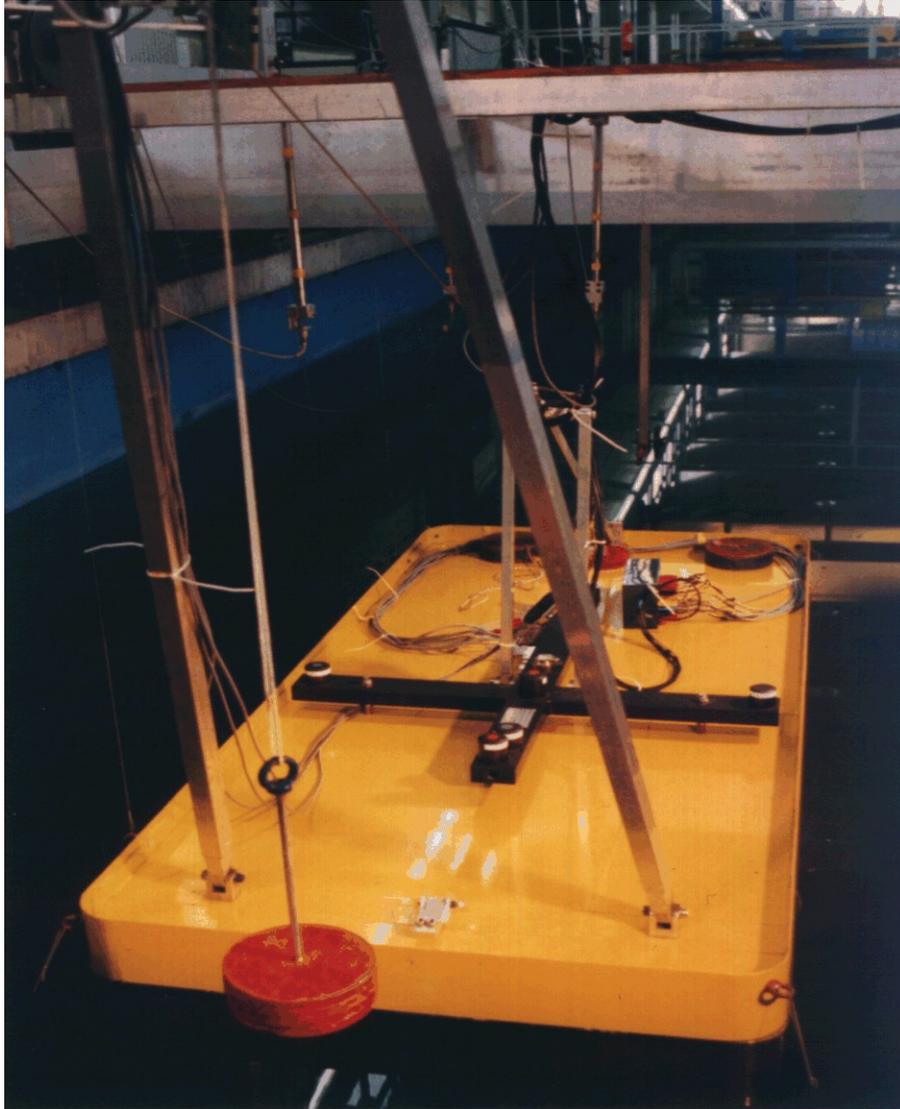


Abb. 24: Kranbarge MAGNUS im Wellenkanal

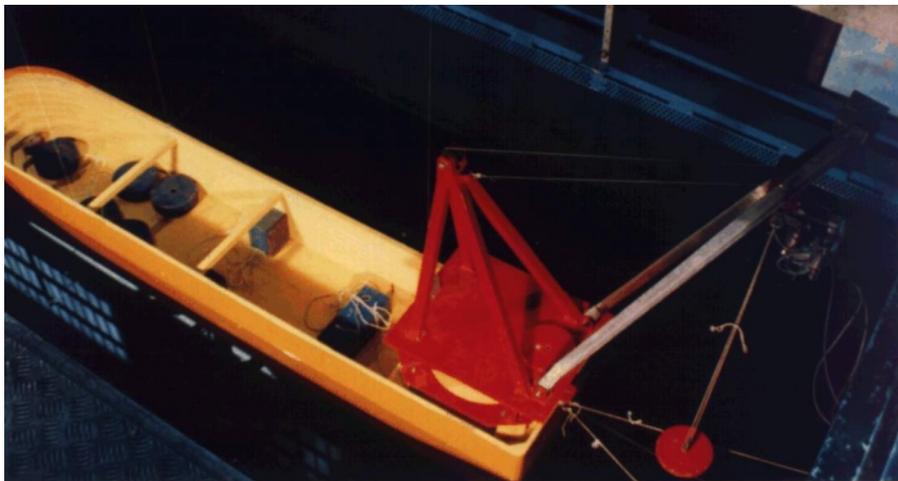


Abb. 25: Kranschiff CASTORO OTTO im Wellenkanal

Querstabilität sowohl des Modells als auch der Großausführung sehr begrenzt. Während des Betriebes des Krans darf der Krängungswinkel vier Grad nicht überschreiten, was bei der Großausführung durch den Einsatz eines Ballastsystems gewährleistet wird. Für den Versuch bedeutet dies, daß die Installation der Meßtechnik außerordentlich sorgfältig durchgeführt werden muß und alle Komponenten so tief wie möglich auf dem Schiff installiert werden müssen. Die Dreikomponentenwaage, die bei der Kranbarge zur Registrierung der Lastbewegungen verwendet wird, kann bei den Untersuchungen des Kranschiffes aufgrund ihres relativ großen Gewichtes und der damit verbundenen hohen Schwerpunktlage nicht sinnvoll eingesetzt werden. Berührungsfreie, optische Weggebersysteme sind für zukünftige Untersuchungen wünschenswert. Für die Befestigung der Verankerungsseile sind auch am Kranschiff spezielle Beschlüge am Bug und Heck in der Mittschiffsebene installiert worden, an denen die Kraftmeßwaagen befestigt werden. Wie bei der Kranbarge werden die Zuleitungen der Meßtechnik bordseitig durchgeführt und senkrecht nach oben zum Schleppwagen geführt.

4.4.3 Kranhalbtaucher *THIALF*

Das Modell des Halbtauchers *THIALF* ist im Maßstab 1:75 aus Sperrholz gefertigt und wird über in die Säulen absenkbar Eisen Gewichte ballastiert. Die zwei Drehkrane der Großausführung mit einer Gesamthubkapazität von 12000 t sind detailliert nachgebildet und werden für die Versuche fixiert. Die Verankerungsseile werden wie bei der Kranbarge und dem Kranschiff an Beschlügen in der Mittschiffsebene angebracht. Durch die Zielsetzung des Projektes wurden für den Halbtaucher zwei verschiedene Verankerungsarten verwendet: Eine sehr harte Verankerung und eine sehr weiche Verankerung, die entsprechend der Modellähnlichkeit nach Froude entworfen wurde. Aufgrund der hohen Verdrängung und der damit verbundenen großen Trägheit des Halbtauchers sind mehrperiodische Bewegungsformen – mit den im Wellenkanal generierbaren regulären Seegängen – nur unter Verwendung sehr steifer Verankerungen möglich. Hierfür konnte ein Verankerungsmechanismus eingesetzt werden, der auch schon bei der Kranbarge und dem Kranschiff Verwendung fand, wobei die Steifigkeiten der eingesetzten Rückstellfedern erhöht werden mußte. Für die Untersuchungen mit einer Verankerungscharakteristik entsprechend der Ähnlichkeit nach Froude wurde ein neues Verankerungssystem eingesetzt, das aufgrund der großen zu erwartenden Längsbewegungen nicht mit Nockenmechanismen realisiert werden konnte. Eine ausführliche Beschreibung des Verankerungsmechanismus findet sich in Abschnitt 4.3.2. Bei dieser Verankerung sind die Rückstellmomente um die Hochachse sowie die dem seitlichen Versatz entgegengesetzten Rückstellkräfte sehr gering. Während des Versuchs werden durch Störeinflüsse ein seitlicher Versatz und Gierbewegungen induziert, die durch die geringen Rückstellkräfte bzw. Momente nicht

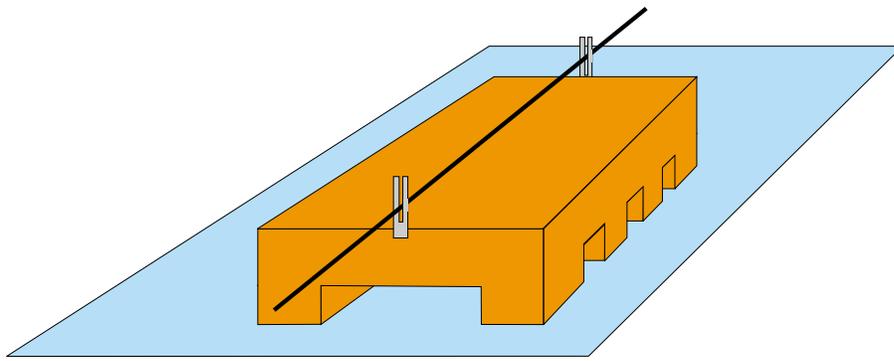
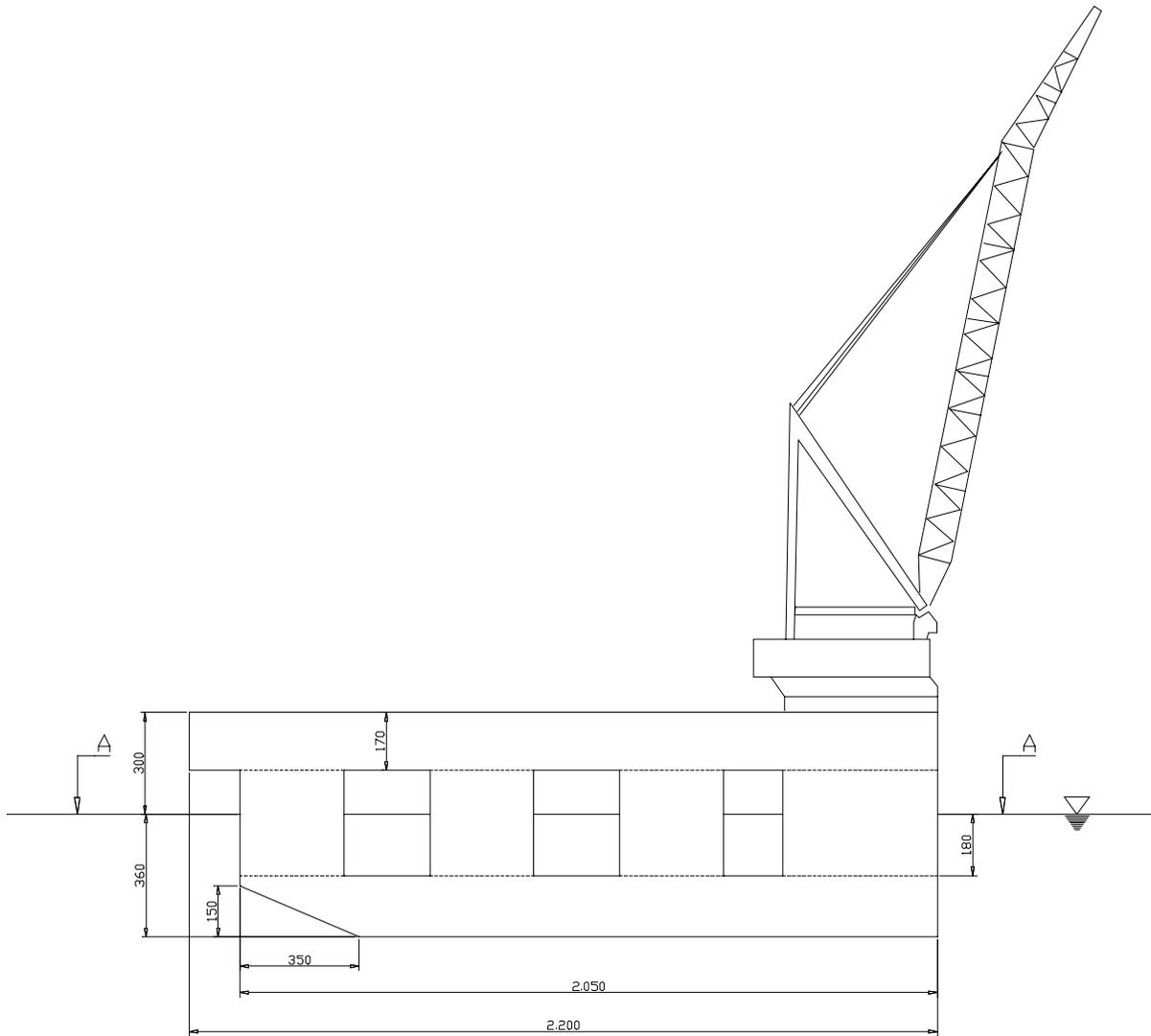


Abb. 26: Fesselung des Halbtauchers

ausreichend kompensiert werden können. Da die Untersuchungen mit dieser Verankerungscharakteristik entscheidend zum Verständnis des Verhaltens unter realen Bedingungen beitragen, wurde eine Lösung gesucht, die die Bewegungen des Halbtauchers in den Freiheitsgraden der Gierbewegung und des Versatzes einschränkt. Realisiert wurde die Fesselung durch Verwendung eines Führungsseiles in der Mittschiffsebene oberhalb des Arbeitsdecks des Halbtauchers. Das Seil wird dabei durch senkrechte, bordseitig installierte Matrizen geführt, die jeweils am Bug und am Heck befestigt sind (siehe Abb. 26). Durch die Verwendung von polierten Aluminiummatrizen und einem graphitgeschmierten Führungsseil aus nichtrostender Stahllitze kann die Reibung des Führungsmechanismus vernachlässigt werden.



Abb. 27: Kranhalbtaucher THIALF im Wellenkanal



Schnitt A-A

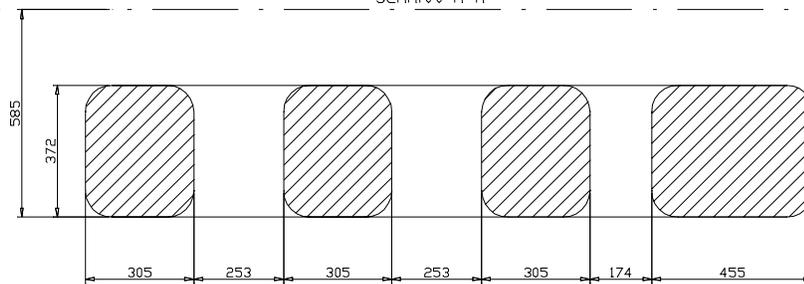


Abb. 28: Modell des Kranhalbtauchers THIALF

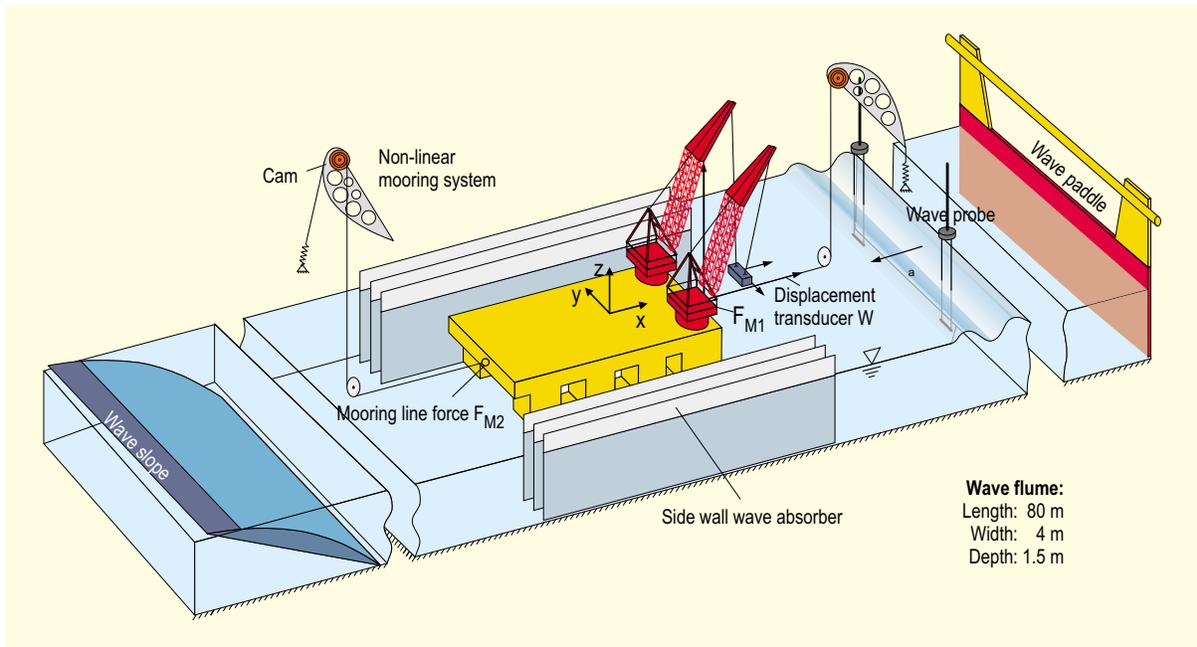


Abb. 29: Versuchsaufbau mit Nocken

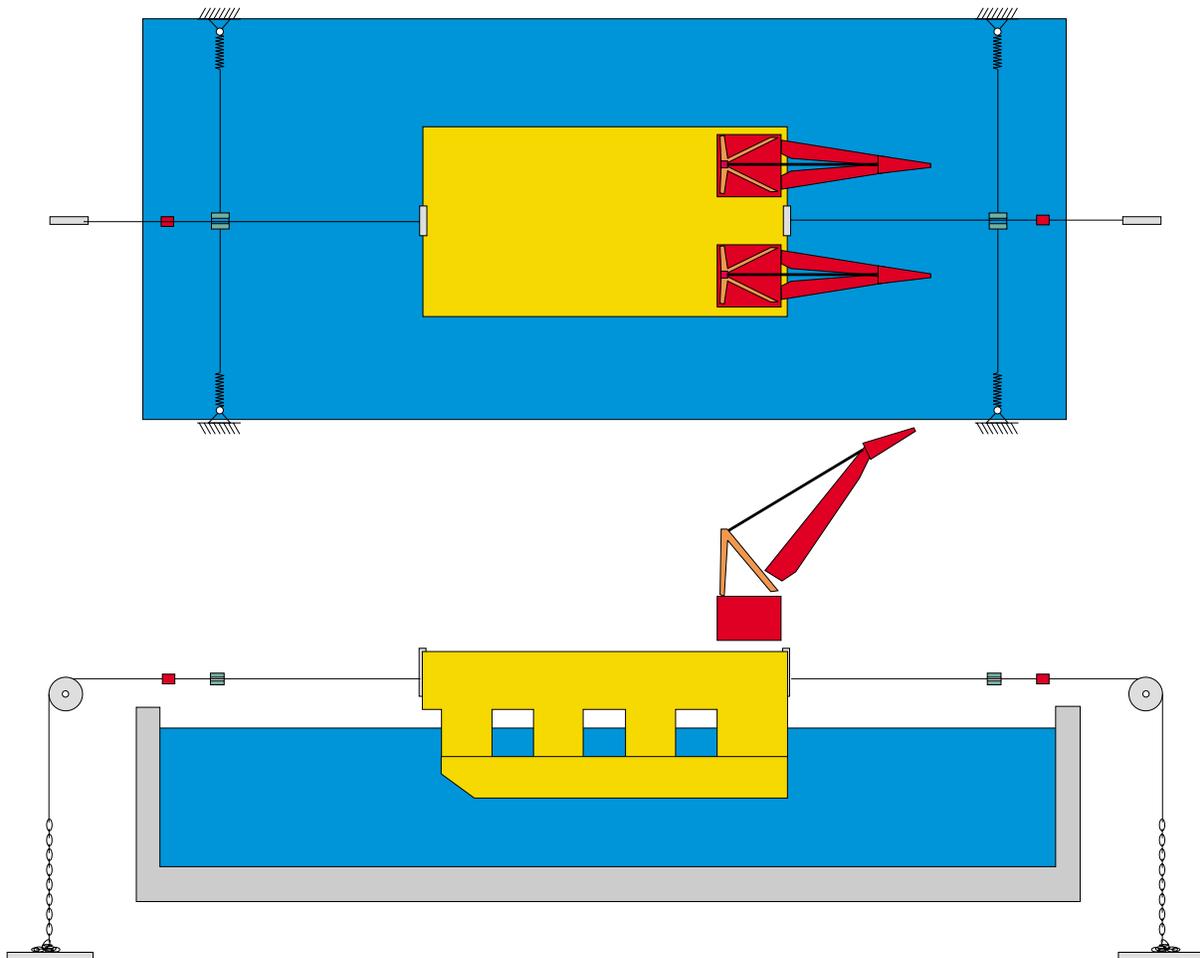


Abb. 30: Verankerung mit Ketten und Federn

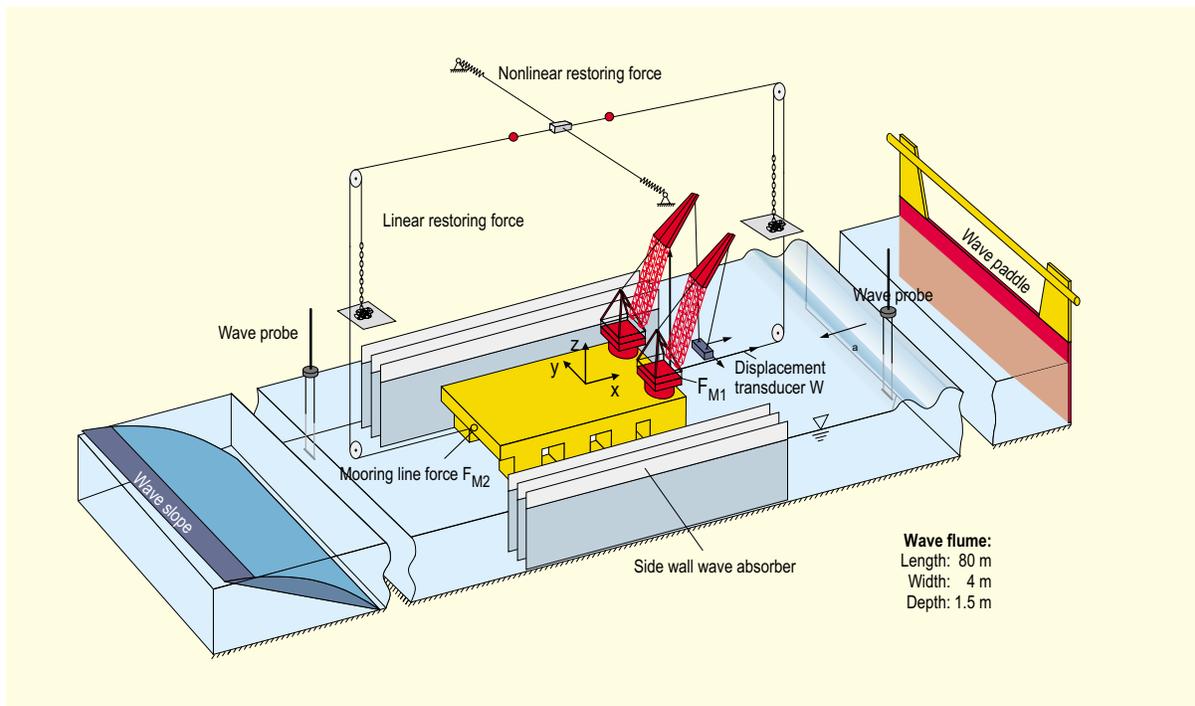
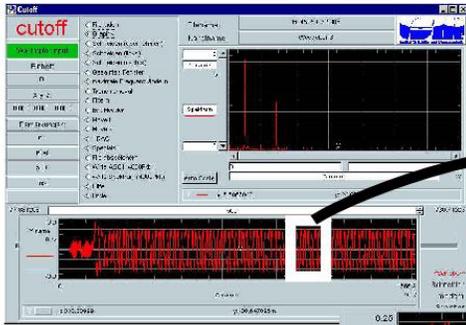


Abb. 31: Versuchsaufbau mit oberliegender Verankerung

4.5 Auswertung

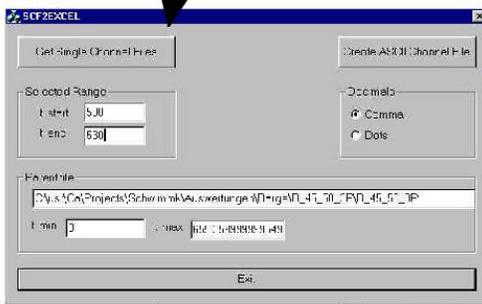
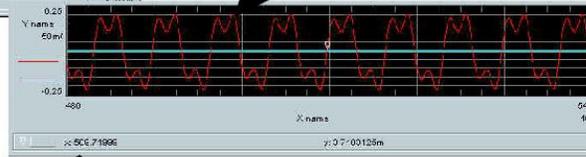
Die am Institut für Schiffs- und Meerestechnik entwickelte Meßsoftware basiert auf dem Programm HP-VEE von Hewlett Packard. HP-VEE beinhaltet – neben Schnittstellenfunktionen für alle gängigen Meßkarten – einen graphischen Editor zur Erstellung meßtechnischer Programme. Mit Hilfe dieser Programmierumgebung wurde am Fachgebiet Meerestechnik eine Vielzahl von Teilprogrammen erstellt, die für die Messung, aber auch für Analysezwecke eingesetzt werden. Die mit einer Meßrate von 100 Hz aufgenommenen Daten werden in einem binären Dateiformat abgespeichert und können in einzelnen korrespondierenden Programmmodulen weiter verarbeitet werden. Da HP-VEE auf lauffzeitinterpretierten Routinen beruht, ist die Verarbeitung großer Mengen von Meßdaten sehr zeitaufwendig. HP-VEE bietet jedoch die Möglichkeit der Einbindung von DLLs (Dynamik Link Libraries), die in Fortran, C oder C++ implementiert werden können. Zur Beschleunigung des Auswertungsverfahrens wird auf die Programmierung konventioneller C++-Routinen zurückgegriffen, die ergänzend zu den HP-VEE Modulen eingesetzt werden. Die Vorgehensweise bei der Analyse und Verarbeitung der Schwimmkranuntersuchungen ist im wesentlichen in vier Schritte unterteilt, die in Abb. 32 dargestellt werden. Die erste Analyse der Meßdaten erfolgt direkt nach der Messung mit Hilfe der HP-VEE basierten Meß- und Analysesoftware, anschließend wird ein Meßbereich ausgewählt und die Daten für die Verarbeitung mit ASCII-basierten Tabellenkalkulationsprogrammen konvertiert. Die graphische Darstellung der Meßreihen erfolgt anschließend mit Hilfe von MS-Excel.

Phasendiagramme – der für die Schwimmkrane charakteristischen Längsbewegung – werden durch Verarbeitung des Single-Channel-Files (das ist die binäre Registrierung eines einzelnen Meßschriebes) berechnet. Das hierzu in C++ entwickelte Programm bietet die Möglichkeit der Rauschunterdrückung durch abschnittsweise Mittelwertbildung des Geschwindigkeitsgradienten, wobei die Anzahl der einzubeziehenden Meßpunkte frei wählbar ist.



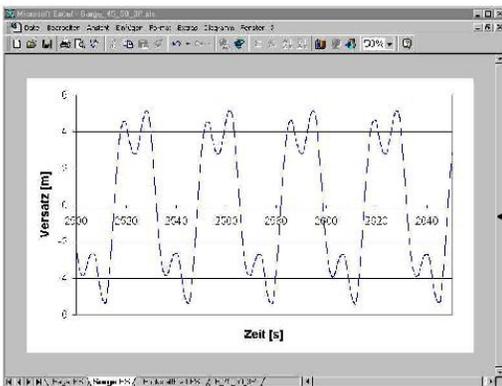
Auswahl eines Zeitbereiches aus der Messung

Umwandlung der Binärdaten in ASCII-Tabellen



Verankerungs- Kraft 1	y-Kraft 2	z-Kraft 3	Weggeber 1	Weggeber 2	Weggeber 3	Pegel 1
2,15295	22,3905	-0,247709	-44,9717	-0,009426	0,0575409	-0,086465
4,62958	23,3638	-0,247709	-36,1307	-0,0101845	0,0572485	-0,0312056
8,23233	23,3838	-0,248984	-47,9284	-0,0119401	0,0687597	-0,093842
11,4313	24,0967	-0,247709	-45,2623	-0,0138985	0,0690748	-0,0964758
14,6329	24,3069	-0,249459	-54,067	-0,0154541	0,0651975	-0,0992123
15,1533	25,0997	-0,458973	-46,7961	-0,0171191	0,0643172	-0,101554
13,1734	25,3161	-0,143564	-51,9769	-0,0189737	0,0531458	-0,104239
8,97331	26,5292	-0,352723	-47,1976	-0,0203222	0,0618748	-0,106631
4,89737	26,5292	-0,0578994	-55,8145	-0,0229977	0,0606099	-0,109176
2,51897	27,8988	-0,249459	-50,6381	-0,0240518	0,0584323	-0,111324
1,56701	27,9888	-0,142898	-52,1283	-0,0257099	0,0582635	-0,113665
13	500,12	-0,875991	0,0433546	25,4493	-0,248459	-46,4324
14	500,13	-0,874959	-0,997599	29,8555	-0,593804	-54,9704
15	500,14	-0,876824	-0,163003	30,1812	-0,458973	-49,9677
16	500,15	-0,845954	0,225811	30,1749	-0,141814	-56,5973
17	500,16	-0,849787	0,512855	30,9079	-0,248984	-50,272
18	500,17	-1,01975	2,60611	30,415	-0,248984	-55,9782
19	500,18	-0,846787	5,24155	31,6407	-0,457749	-49,5
20	500,19	-1,01975	7,28771	31,389	-0,141814	-56,7805
21	500,2	-0,845954	9,79816	32,1272	-0,450374	-53,7376
22	500,21	-0,845954	12,6705	32,1209	-0,591893	-61,3584
23	500,22	-0,874959	15,2377	32,6137	-0,52769	-52,5806
24	500,23	-0,874959	13,6389	32,8638	-0,456873	-56,7562
25	500,24	-0,733166	19,4309	33,3403	-0,593844	-50,6663
26	500,25	-0,663203	6,96471	33,0639	-0,458973	-59,454
27	500,26	-0,684136	5,0576	33,8269	-0,563844	-53,7195
28	500,27	-0,734099	4,37115	33,8269	-0,668913	-55,1969
29	500,28	-0,734099	2,18078	34,5599	-0,697789	-48,4221
30	500,29	-0,804995	1,28794	34,3134	-0,697789	-54,4616
31	500,3	-0,846995	0,84859	34,7999	-0,877528	-52,1969
32	500,31	-0,875991	3,00273	34,6535	-0,665163	-57,8963
33	500,32	-0,875991	6,0294	35,04	-0,52769	-49,4987
34	500,33	-0,875991	7,56703	34,907	-0,733694	-54,8304

Konvertierung in MS-Excel Tabellen



Graphische Darstellung der Meßreihen

Abb. 32: Auswertung der Meßdaten

5 Ergebnisse

Ausgehend von der einfachsten zu simulierenden Schwimmkrankonfiguration sind die zu untersuchenden Systeme und die zu berücksichtigenden Einflußparameter sukzessive ausgebaut und komplettiert worden. Beim Vergleich zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen ist mit der Untersuchung des zweidimensionalen Bewegungsverhaltens der MAGNUS Kranbarge begonnen worden. Hierbei wird das Modell bei einem Welleneintrittswinkel von 180° in regulären Wellen für unterschiedliche Seil- und Wellenlängen untersucht. Besonderer Wert wurde dabei auf die Simulation von nichtlinearen Verankerungskräften und der Erzeugung mehrperiodischer Schwingungen gelegt. In darauf folgenden Untersuchungen wurden das Kranschiff und die komplexere Struktur des Kranhalbtauchers untersucht.

Die Untersuchungen wurden in Hinblick auf fünf Bereiche durchgeführt:

- Untersuchung realistischer Betriebszustände
- Auffinden mehrperiodischer Bewegungsformen
- Untersuchung der Anfangszustände zur Erzeugung mehrperiodischer Schwingungen
- Stabilität der Bewegungsform
- Einfluß einzelner Betriebsparameter

Die Schwerpunkte bei den Untersuchungen variieren zwischen den oben aufgeführten Bereichen je nach Charakteristik des Seegangsverhaltens und der Stabilität des Bewegungsverhaltens des jeweiligen Schwimmkrantyps. In den folgenden Abschnitten 5.1 bis 5.5 werden die Verankerungscharakteristika, die Bewegungsformen und entscheidende Systemparameter sowie die für die Bewertung relevanten Beobachtungen erläutert.

5.1 Verankerungen

Die geforderten Rückstellkräfte konnten mit den eingesetzten Verankerungsmechanismen ausreichend genau modelliert werden. Der Wirkungsbereich der unterschiedlichen Mechanismen ist durch die Art der Mechanik und die Entwurfsmethode bezüglich der maximalen Auslenkung beschränkt. Alle Verankerungen wurden entsprechend der zu erwartenden größten Auslenkung entworfen.

Abb. 33 bis 35 zeigen Zeitschriebe der Rückstellkräfte der Verankerungen von Barge, Kranschiff und Kranhalbtaucher mit Entwurfskurven und Rückstellkoeffizienten der Verankerung, wie sie für eine Verifizierung des numerischen Modells optimal sind.

Für die Versuche mit einer sehr weichen Verankerung – wie sie für den Kranhalbtaucher durchgeführt wurden – mußte die in Abschnitt 4.3.2 beschriebene Verankerung verwendet werden, da große Auslenkungen nicht ausreichend gut mit dem Nockenmechanismus modelliert werden können. Die Charakteristik dieser – vom Germanischen Lloyd dimensionierten – realistischen Verankerung ist in Abb. 36 dargestellt.

5.2 Kranbarge *MAGNUS*

Für die Kranbarge konnten nichtlineare Effekte im Bereich realistischer Erregerseegänge und Verankerungskräfte nachgewiesen werden. Für die im Modellversuch gewählte Verankerungscharakteristik (Gl.(7) mit $c_1 = 101 \frac{kN}{m}$, $c_2 = -5.58 \frac{kN}{m^2}$, $c_3 = 24.8 \frac{kN}{m^3}$ – Abb. 33) zeigt Abb. 37 beispielhaft die

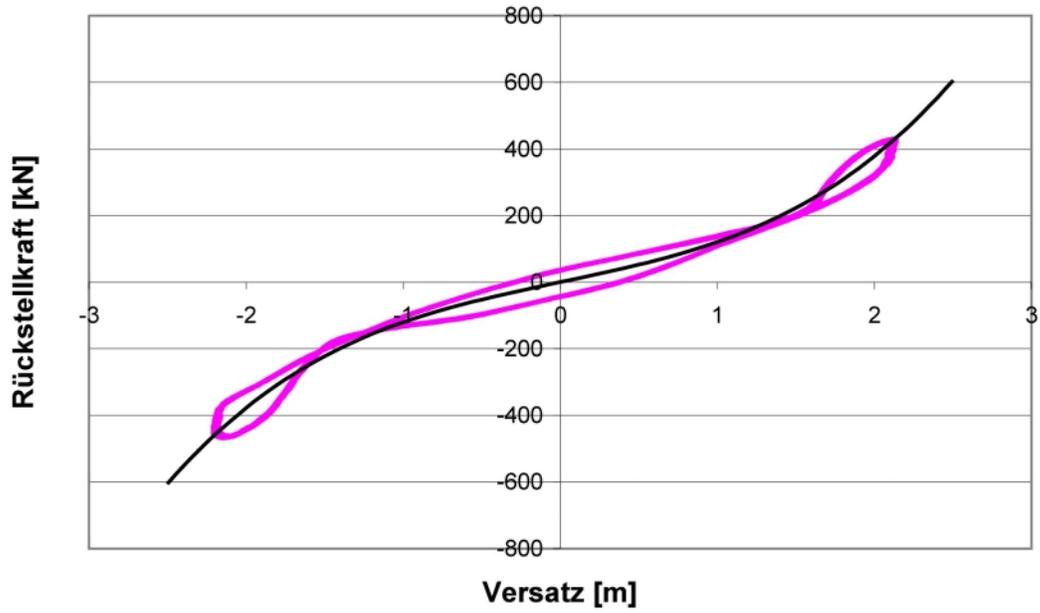


Abb. 33: Verankerungscharakteristik MAGNUS: $c_1 = 101 \frac{kN}{m}$, $c_2 = -5.58 \frac{kN}{m^2}$, $c_3 = 24.8 \frac{kN}{m^3}$

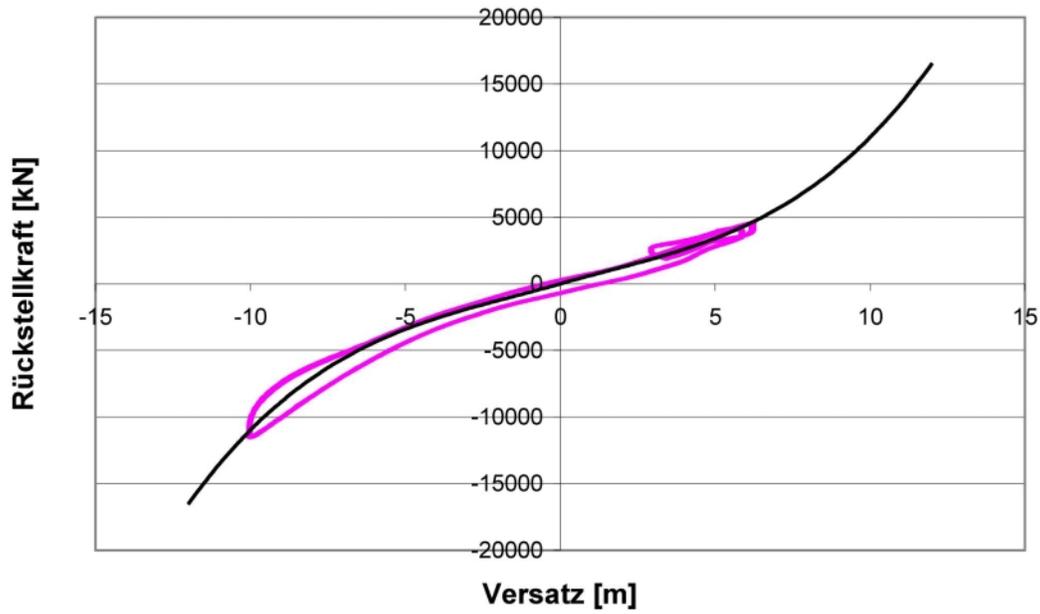


Abb. 34: Verankerungscharakteristik CASTORO OTTO: $c_1 = 670 \frac{kN}{m}$, $c_2 = -37.5 \frac{kN}{m^2}$, $c_3 = 8.045 \frac{kN}{m^3}$

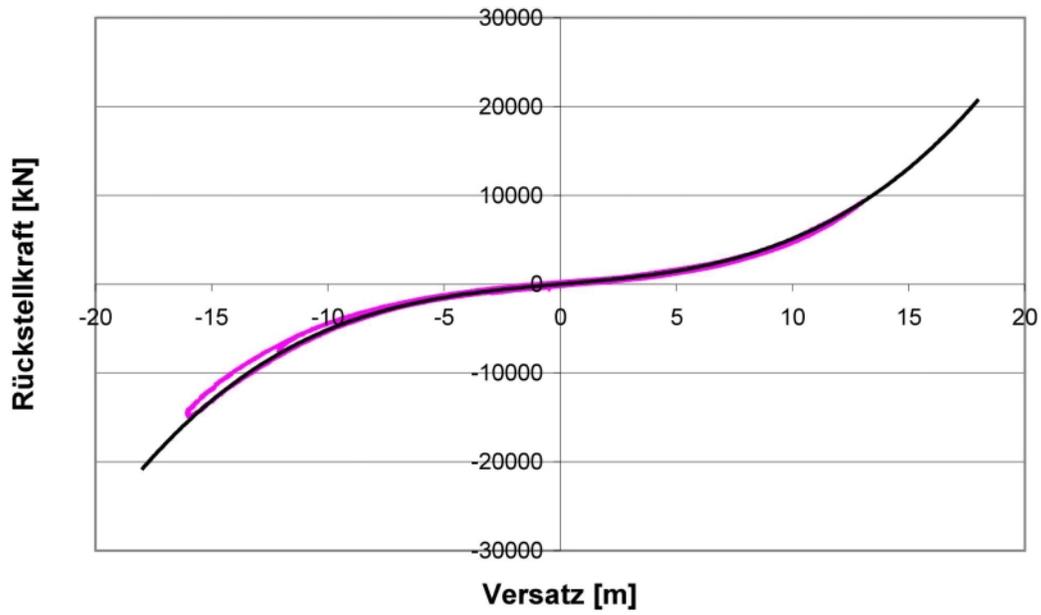


Abb. 35: Harte Verankerungscharakteristik THIALF: $c_1 = 226 \frac{kN}{m}$, $c_2 = -1.93 \frac{kN}{m^2}$, $c_3 = 2.87 \frac{kN}{m^3}$

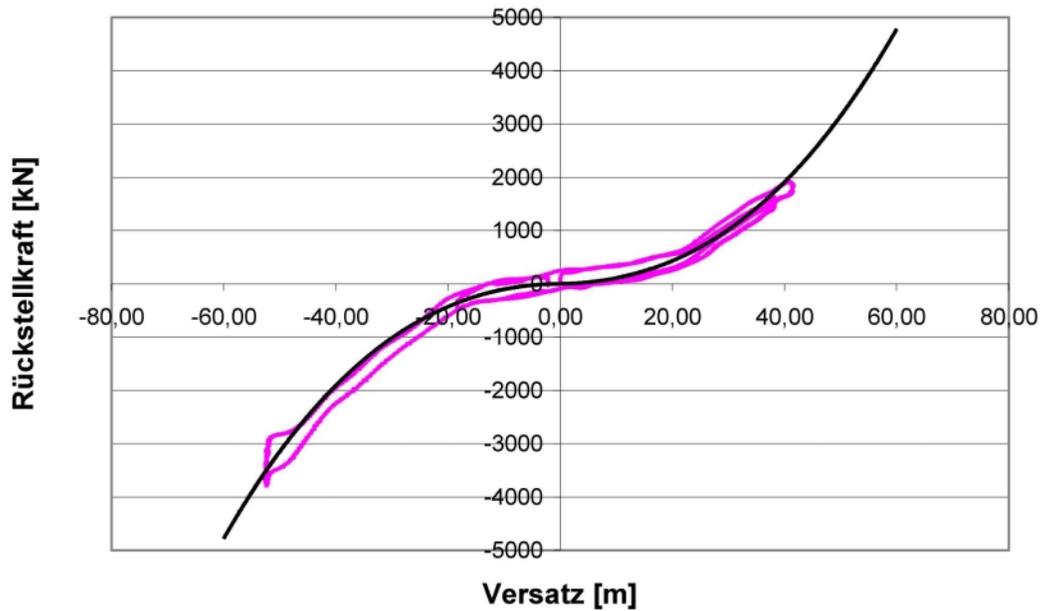


Abb. 36: Weiche Verankerungscharakteristik THIALF: $c_1 = 1.06 \frac{kN}{m}$, $c_2 = 0.879 \frac{kN}{m^2}$, $c_3 = 0.0072 \frac{kN}{m^3}$

Wellenauslenkung des Erregerseeganges und den deutlich vergrößerten Längsversatz einer dreiperiodischen Bewegung der Kranbarge. Die Surgeamplitude erreicht hierbei einen mehr als fünffachen Wert der Wellenamplitude. Durch die nichtlinearen Verankerungskräfte (für diesen Fall dargestellt in Abschnitt 5.1, Abb. 33) bedeutet dies eine Vergrößerung der nominellen Rückstellkraft um den Faktor zehn. In systematischen Versuchsserien konnten sowohl zwei- als auch dreiperiodische Bewegungszustände über einen weiten Frequenz- und Amplitudenbereichbereich des regulären Seegangs identifiziert werden. Bei Wellenperioden von 10,64 s bis 15,75 s und Wellenhöhen von 0,87 m bis 2,0 m lassen sich koexistierende Bewegungsformen nachweisen. Charakteristisches Merkmal und für den Betrieb kritischer Parameter dieser Bewegungsformen sind die deutlich vergrößerten Auslenkungen in Richtung der Längsachse des Schwimmkranes (Abb. 38). Die Amplituden der mehrperiodischen Längsbewegung erreichen dabei einen vielfachen Wert der Amplituden der einperiodischen Bewegung. Für die ein-, zwei- und dreiperiodische Bewegung zeigt Abb. 39 die Kräfte in den Verankerungsseilen im direkten Vergleich. Abb. 40 und 41 geben Registrierungen und Phasendiagramme der zweiperiodischen Surgebewegung der Kranbarge im Vergleich zur einperiodischen Bewegung an.

Aufgrund des stabilen Bewegungsverhaltens der Kranbarge konnten umfangreiche Untersuchungen zur Induzierung der mehrperiodischen Bewegungen durchgeführt werden. Unterschiedliche Arten von Störungen wurden auf das einperiodisch eingeschwungene System aufgebracht, um eine sichere Methode zu finden, bei der durch die Störung ein mehrperiodisches Verhalten induziert wird. Die Störungen wurden alternativ an der Last oder an der Barge bzw. dem Kranausleger aufgebracht und in ihrer Art variiert. Als zuverlässigste Methode – die in der Folge bei der Barge als auch den anderen Schwimmkranen angewandt wurde – kristallisierte sich eine einseitige Fesselung des Kranauslegers mit gleichzeitiger Auslenkung heraus. Dabei wird der Kran in Richtung der Wellenmaschine über ein an der Krannock angeschlagenes Seil ausgelenkt, so daß die Fesselung die Bewegung ausschließlich in entgegengesetzter Richtung verhindert (Abb. 42). Die Lage der Fesselung wurde dabei stets größer gewählt als die Amplitude der einperiodischen Schwingung.

Die Stabilität aller Bewegungsformen erwies sich bei der Kranbarge als außergewöhnlich hoch. Der mehrperiodisch eingeschwungene Zustand wird auch nach Aufbringen weiterer äußerer Störungen beibehalten. Das Bewegungsverhalten wurde hinsichtlich Veränderungen in der Amplitude des Erregerseeganges als auch der Erregerfrequenz untersucht. Dabei ist ein Zusammenhang zwischen Erregerfrequenz und Surgeamplitude feststellbar, jedoch nicht quantifizierbar. Die Amplitude des Seegangs erscheint zweitrangig, jedoch wird bei allen Versuchen, bei denen die Wellenamplitude sukzessive reduziert wird, eine Grenzamplitude erreicht, bei der das System von der mehrperiodischen Bewegung in die harmonische einperiodische Schwingungsform übergeht. Die Systemparameter der Last, d.h. Seillänge und Masse wurden im Bereich der mehrperiodischen Schwingungen untersucht und variiert. Relevante Einflüsse dieser Parameter konnten experimentell nicht nachgewiesen werden.

5.3 Kranschiff *CASTORO OTTO*

Zur Identifizierung mehrperiodischer Bewegungen des Kranschliffes wurden die Systemparameter der Verankerung und des Erregerseeganges systematisch variiert. Für Verankerungen, die in ihrer Steifigkeit eine härtere Charakteristik aufweisen als vom Germanischen Lloyd für diesen Fall vorgegeben, können mehrperiodische Bewegungsformen erzeugt werden. Die identifizierten ein-, zwei- und dreiperiodischen Bewegungen können am verlässlichsten – wie bei der Kranbarge – durch einseitige Fesselung bei gleichzeitiger Auslenkung der Krannock entgegen dem anlaufenden Seegang induziert werden. Die Stabilität der Bewegungsform entspricht der der Kranbarge, jedoch sind die Möglichkeiten für Störungen, die während des Versuchs aufgebracht werden können – aufgrund der geringen statischen Querstabilität – erheblich eingeschränkt (vergleiche Abschnitt 4.4.2). Für

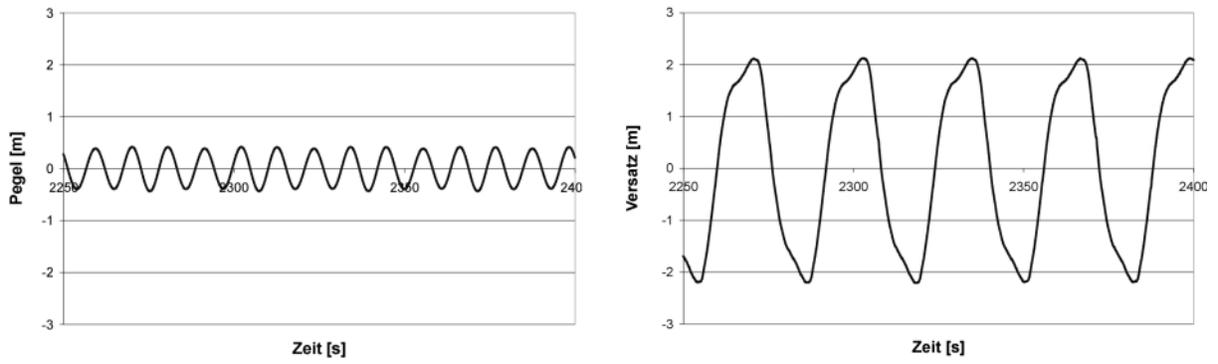


Abb. 37: Pegel und dreiperiodische Längsbewegung der Kranbarge

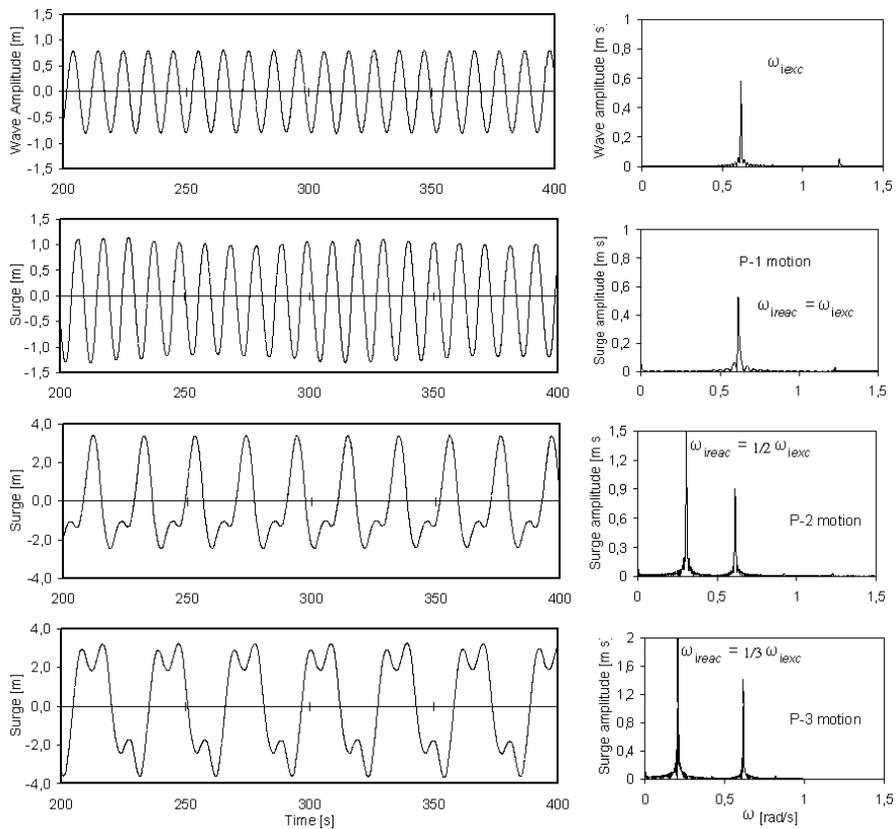


Abb. 38: Ein-, zwei und dreiperiodische Längsbewegung der Kranbarge

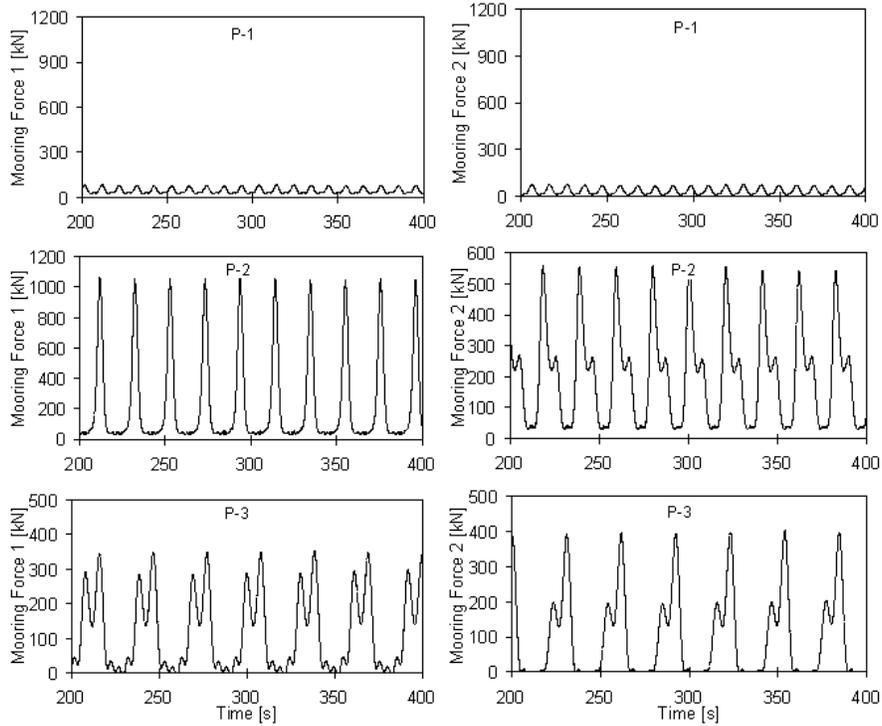


Abb. 39: Verankerungskräfte der ein-, zwei und dreiperiodische Längsbewegung der Kranbarge

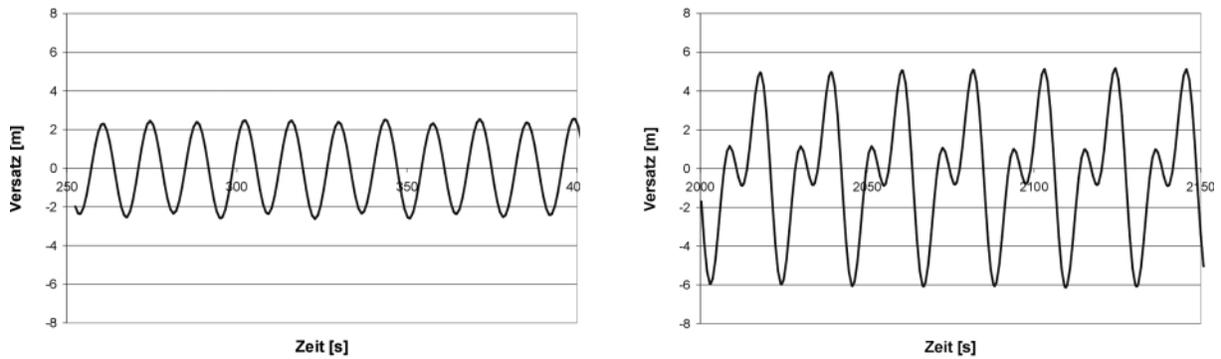


Abb. 40: Ein- und zweiperiodische Längsbewegung der Kranbarge

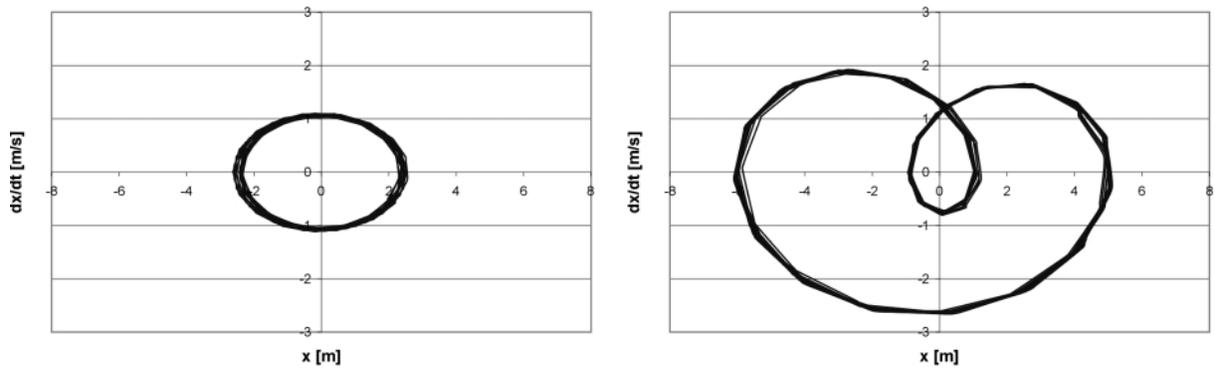


Abb. 41: Phasendiagramme der ein- und zweiperiodische Längsbewegung der Kranbarge

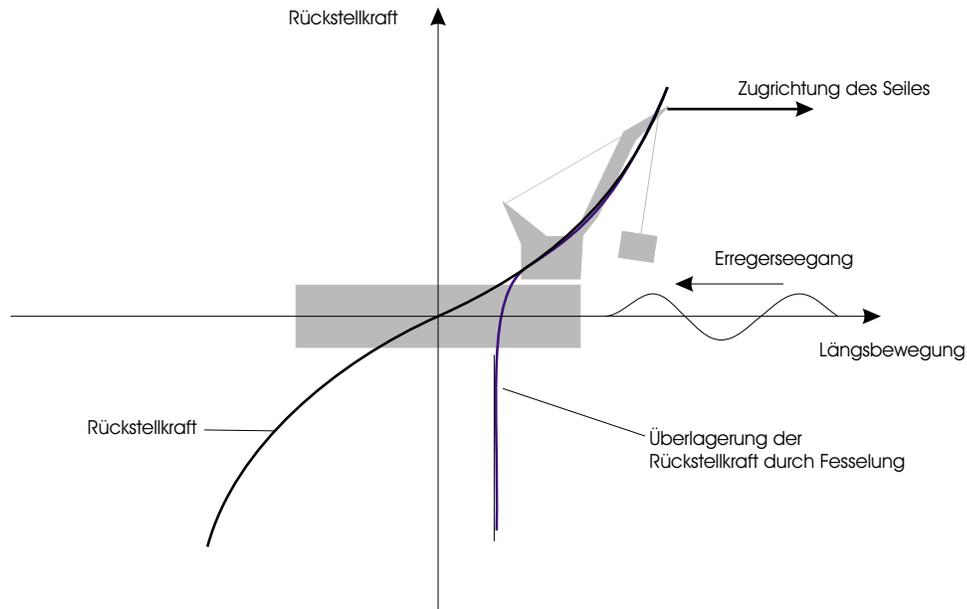


Abb. 42: Erregung mehrperiodischer Bewegungszustände durch einseitige Fesselung

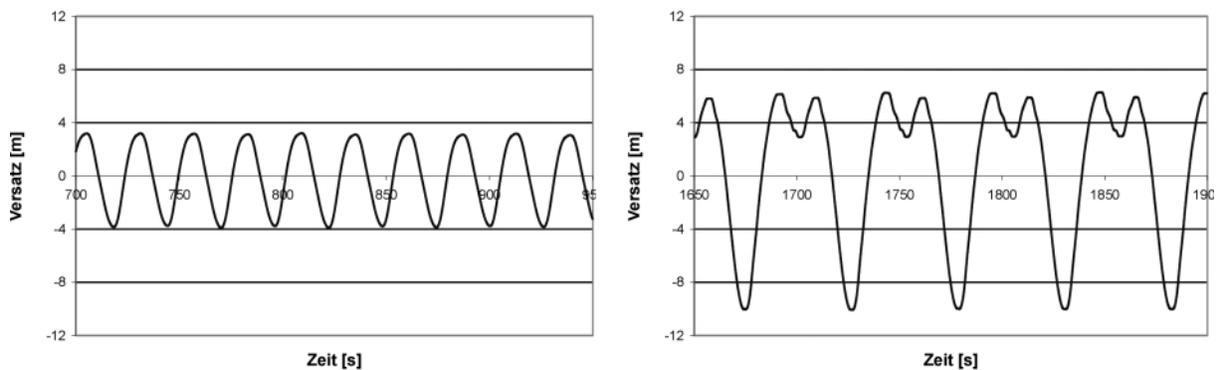


Abb. 43: Ein- und zweiperiodische Bewegung des Kranschiffes

die im Modellversuch gewählte Verankerungscharakteristik (Gl.(7) mit $c_1 = 670 \frac{kN}{m}$, $c_2 = -37.5 \frac{kN}{m^2}$, $c_3 = 8.045 \frac{kN}{m^3}$ – Abb. 34) zeigen die Abb. 43 und 44 die ein- und zweiperiodische Längsbewegung des Kranschiffes sowie die korrespondierenden Phasendiagramme. Registrierungen der dreiperiodischen Bewegung sowie die zugehörigen Phasendiagramme sind in Abb. 45 und 46 im Vergleich zur einperiodischen Lösung wiedergegeben.

Für Verankerungen entsprechend den Vorgaben des Germanischen Lloyd werden nur einperiodische Antworten des verankerten Schiffes beobachtet – ein Verhalten, das auch für verankerte Kranhalbtaucher charakteristisch ist, wie in Abschnitt 5.4 eingehend analysiert. Der Einfluß der Last kann für die untersuchten Bewegungsformen vernachlässigt werden. Der maximale relative Lastanteil beträgt bei der CASTORO OTTO nur ca. 2,5%. Das Bewegungsverhalten entspricht in weiten Teilen dem der Kranbarge, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Auslegung des Verankerungssystems so gewählt wurde, daß das numerische Modell verifiziert werden konnte.

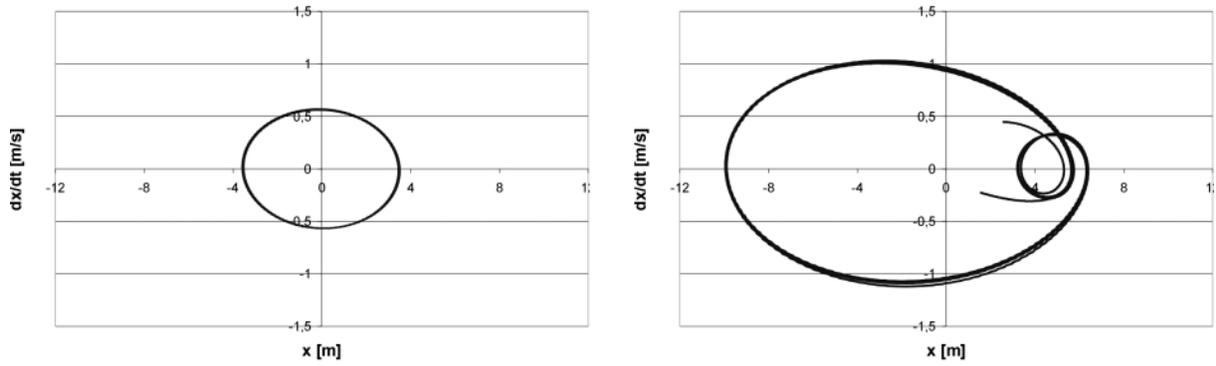


Abb. 44: Phasendiagramme der ein- und zweiperiodischen Bewegung des Kranschiffes

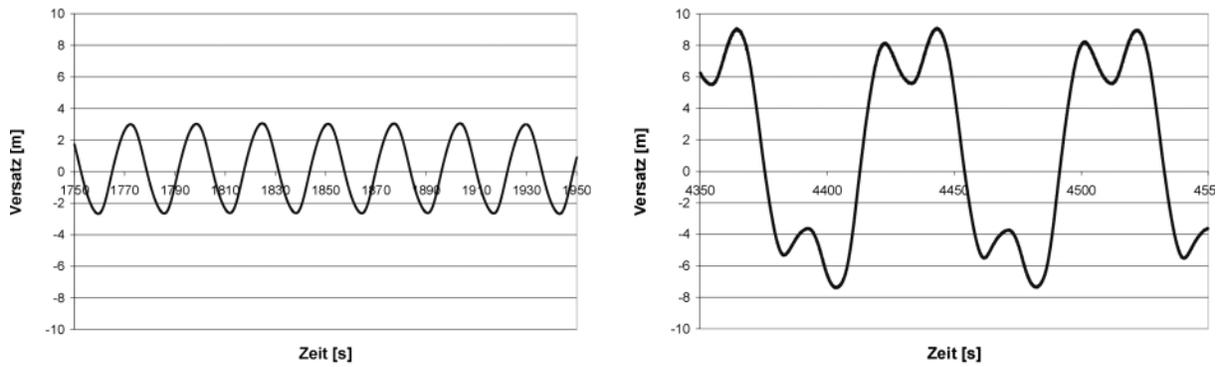


Abb. 45: Ein- und dreiperiodische Bewegung des Kranschiffes

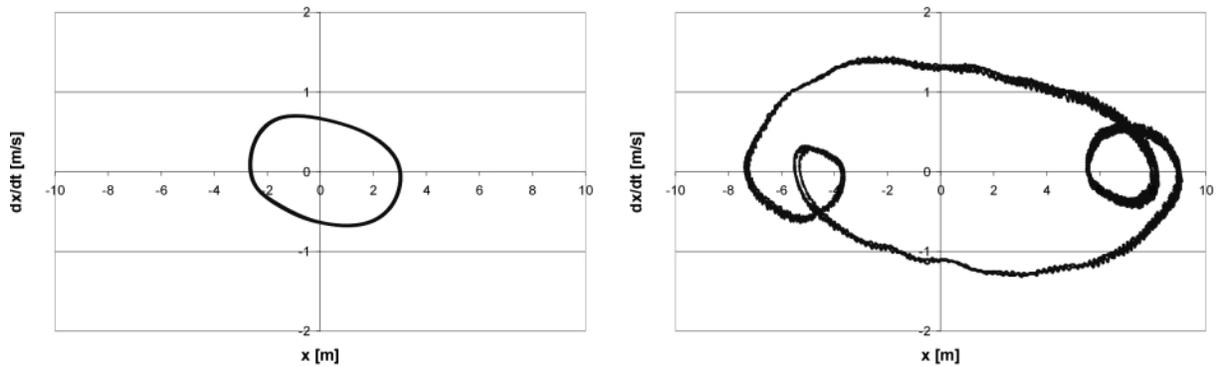


Abb. 46: Phasendiagramme der ein- und dreiperiodischen Bewegung des Kranschiffes

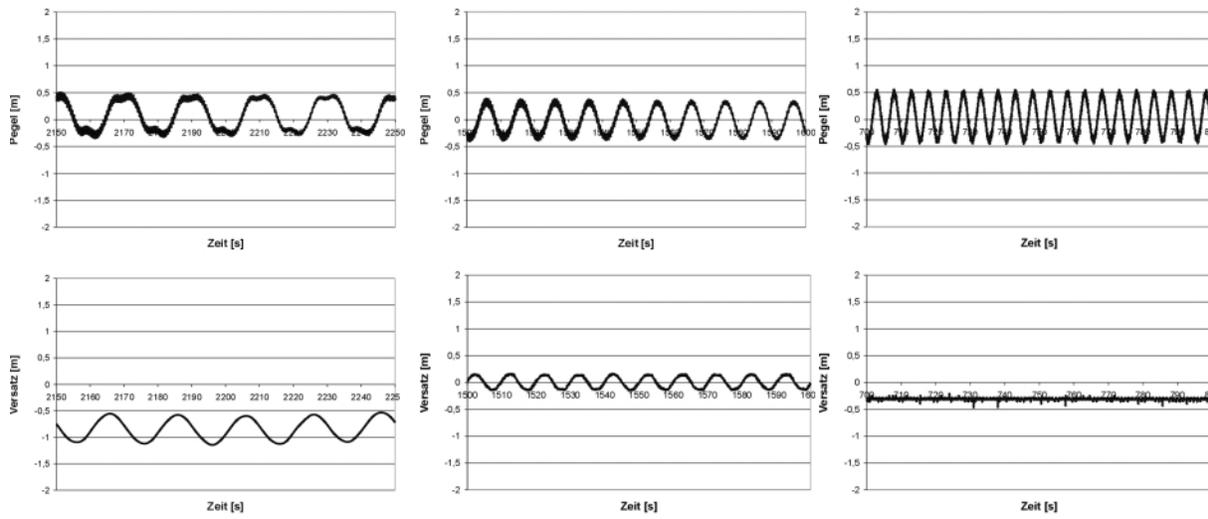


Abb. 47: Pegelschriebe und Surgebewegungen des Kranhalbtauchers

5.4 Kranhalbtaucher THIALF

Von den bislang untersuchten Schwimmkränen (Barge, Schiff) unterscheidet sich das Halbtauchermodell zum einen durch seine Bauform, zum anderen durch seine große Verdrängung (440 kg gegenüber 120 kg). Das dynamische Verhalten von Halbtauchern zeichnet sich – im Vergleich zur Barge und dem Kranschiff – durch geringe Dämpfung und – im Verhältnis zur Verdrängung – geringe Rückstellkräfte und Momente der Tauch- und Stampfbewegung aus. Die Dämpfung der Längsbewegung hingegen ist erheblich größer und führt zu einem völlig anderen Verhalten des Halbtauchers.

Zur Überprüfung des Gültigkeitsbereiches der numerischen Simulation ist der zweidimensionale Parameterraum (Periode und Amplitude) regulärer Wellen unter Verwendung der maßstabsgetreuen – nach den Vorgaben des Germanischen Lloyd entworfenen – Verankerungscharakteristik (Gl.(7) mit $c_1 = 1.06 \frac{kN}{m}$, $c_2 = 0.88 \frac{kN}{m^2}$, $c_3 = 0.0072 \frac{kN}{m^3}$ – Abb. 36) systematisch durchfahren worden. Hierfür ist die in Kapitel 4.3.2 beschriebene Verankerung verwendet worden. Die geringen Rückstellkräfte der Verankerung machen eine Fesselung des Halbtauchers in der Mittschiffsebene notwendig (nähere Erläuterungen siehe Abschnitt 4.4.3). Im Bereich der – mit dem Germanischen Lloyd abgestimmten – realistischen Seegänge für den Kranhalbtaucher sind keine mehrperiodischen Bewegungsformen identifiziert worden. Abb. 47 zeigt die Pegelschriebe der Erregerseegänge und die Meßdaten der Längsbewegungen des Kranhalbtauchers bei drei verschiedenen Wellenperioden. Die abgebildeten Kurven für $T_1 = 20s$, $T_2 = 10s$ und $T_3 = 5s$ sind beispielhaft für den Bereich der untersuchten Seegänge abgebildet. Im Bereich zwischen $T_1 = 20s$ und $T_3 = 5s$ sind zehn unterschiedliche Frequenzen bei jeweils ca. 5 - 10 unterschiedlichen Wellenamplituden untersucht worden.

Da sich mit einer realistischen Verankerung nur einperiodische Bewegungen ergaben, wurde die Verankerungscharakteristik zur Auffindung mehrperiodischer Bewegungsformen systematisch verändert. Ausgehend von der bewährten Verankerung mit Nocken und Federn wurden unterschiedliche Nockenformen und Federn kombiniert. Bedingt durch die große Masse des Halbtauchers ist die Eigenperiode der Längsschwingung des Systems Schwimmkran/Verankerung – bei gleicher Verankerungscharakteristik – erheblich höher als bei den leichteren Modellen. Da die Eigenperiode des Systems entscheidenden Einfluß auf die Existenz mehrperiodischer Bewegungsformen hat, ist gegenüber der ersten Versuchsreihe eine deutlich steifere Verankerung zum Einsatz gekommen, um die Eigenperiode zu verkleinern und die gesuchten Schwingungen zu erzeugen. Die bei diesen Versuchen auftretenden hohen Belastungen des Versuchsaufbaus erlauben jedoch keine beliebige Versteifung der Veranke-

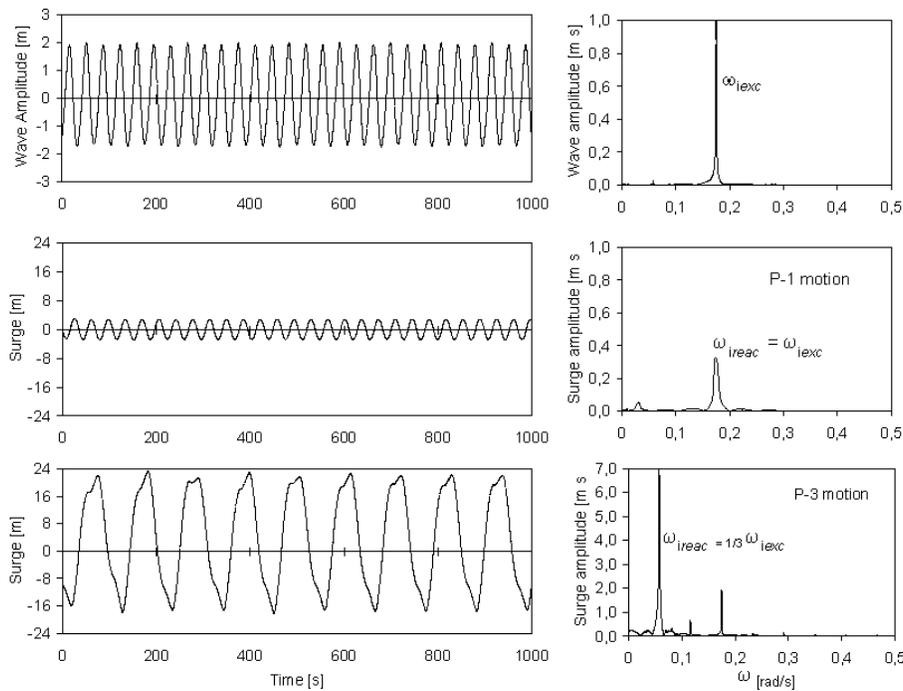


Abb. 48: Ein- und dreiperiodische Längsbewegung des Kranhalbtauchers mit den korrespondierenden Fourierpektren

rung, so daß mehrperiodische Bewegungsformen nur im Bereich unrealistisch großer Wellenperioden identifiziert werden. Mit diesen Versuchen kann die Simulationssoftware systematisch validiert werden.

Die Anregung mehrperiodischer Bewegungszustände wird nach derselben Methode durchgeführt, wie bei der Kranbarge und dem Kranschiff. Die Stabilität der verschiedenen Bewegungsformen ist geringer, d.h. mehrperiodische Bewegungsformen können leicht gestört werden und die Induzierung erfordert eine sorgfältige Abstimmung der Systemparameter. Variationen der Seillänge lassen keinen direkten Rückschluß auf ihren Einfluß zu. Mehrperiodische Bewegungen konnten bei untersuchten Seillängen über 100 m (Großausführung) erzeugt werden.

Für die im Halbtauchermodellversuch alternativ gewählte – extrem steife – Verankerungscharakteristik (Gl. (7) mit $c_1 = 670 \frac{kN}{m}$, $c_2 = -37.5 \frac{kN}{m^2}$, $c_3 = 8.045 \frac{kN}{m^3}$ – Abb. 35) zeigen die Abb. 48 und 49 Registrierungen, deren Fourierpektren sowie Phasendiagramme für ein- bzw. dreiperiodische Surgebewegungen des Kranhalbtauchers. In Abb. 50 sind die gemessenen Rückstellkräfte über der Auslenkung des Schwimmkranes bei drei verschiedenen Wellenamplituden aufgetragen. Die darunterliegende Kurve kennzeichnet den Verlauf der Entwurfsmomente, wie sie für die numerische Simulation verwendet wird.

5.5 Beobachtungen

Bei den Untersuchungen der Schwimmkrane sind Phänomene aufgetreten, die im folgenden dokumentiert und interpretiert werden.

- *Hysteresis der Verankerungskraft*

Die resultierende Rückstellkraft, die sich im Seegangversuch als Überlagerung der Kräfte von Bug- und Heckverankerung ergibt, wird im numerischen Modell durch ein Polynom dritten Grades idealisiert. Messungen bei stationärer Auslenkung des Schwimmkranmodells zeigen,

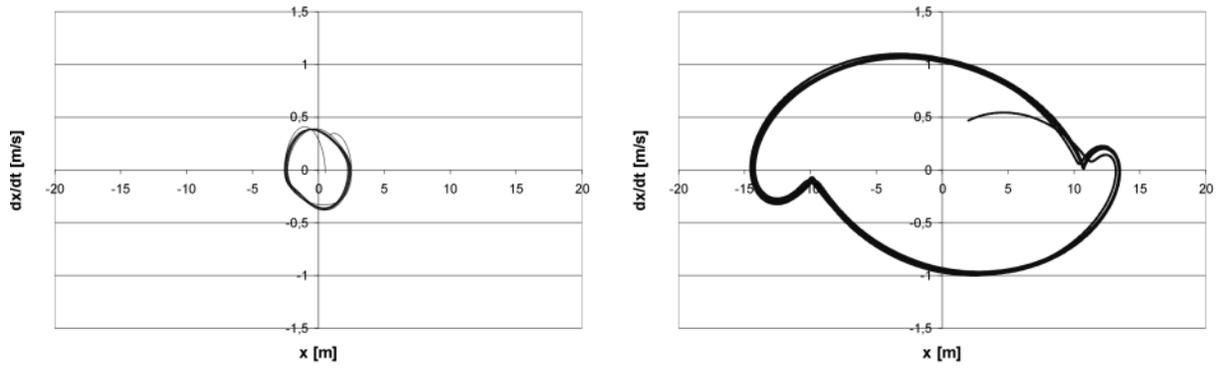


Abb. 49: Phasendiagramme der ein- und dreiperiodischen Bewegung des Kranhalbtauchers

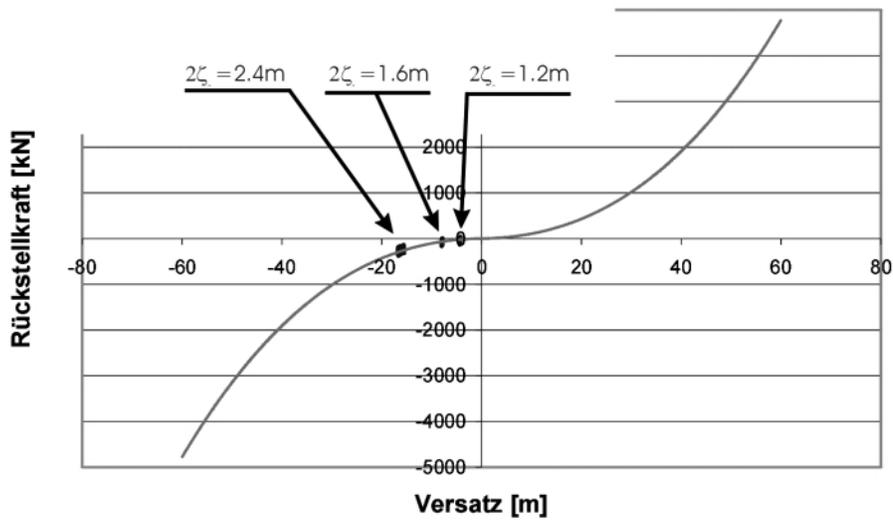


Abb. 50: Änderung der Drift bei unterschiedlichen Amplituden, Erregerseegang $\omega = 0.63 \text{ rad s}^{-1}$

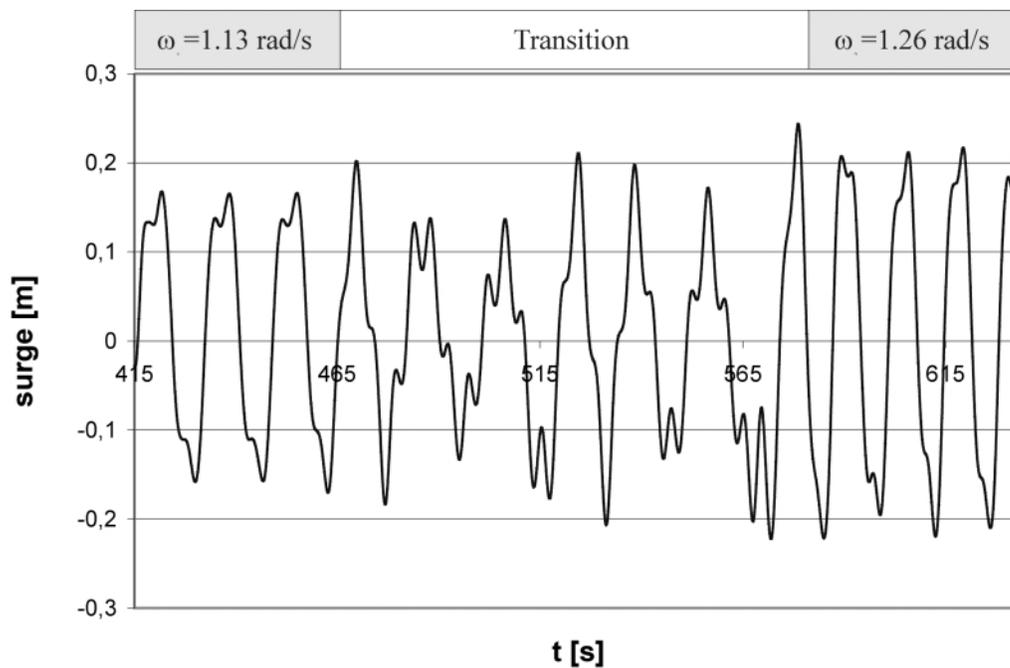


Abb. 51: Änderung der Surgeamplitude bei Erhöhung der Wellenfrequenz

daß die resultierende Verankerungskraft sowohl bei positiver als auch negativer Auslenkung exakt auf dem vorgegebenen Polynom verläuft. Im dynamischen Fall, wenn das Schwimmkranmodell frei oszilliert, verläuft die resultierende Verankerungskraft auf einer Hystereseurve, deren Abweichung von der stationären Verankerungskennlinie während der Versuche konstant bleibt.

- *Frequenzabhängigkeit der Surgeamplitude*

Bei mehrperiodischen Bewegungen stellt sich für eine gegebene Konfiguration der Systemparameter eine definierte Surgeamplitude ein. Verringert man im eingeschwungenen Zustand die Frequenz des Erregerseeganges, so verringert sich die Amplitude der mehrperiodischen Surgebewegung. Wird die Frequenz erhöht, so vergrößert sich die Amplitude der mehrperiodischen Längsbewegung (Abb. 51). Das Phasendiagramm (Abb. 52) dieses Schwingungsvorgangs verdeutlicht dieses Verhalten. Im Zentrum der Abbildung ist ein kreisförmiger Verlauf zu erkennen, der die Bewegungscharakteristik des einperiodischen Falls beschreibt. Nach einer aufgebrachtten Störung schwingt sich das System in den dreiperiodischen Zustand ein, der zwischen dem äußeren – deutlich erkennbaren – Bewegungszustand und dem einperiodischen Fall liegt. Nach Erhöhung der Erregerfrequenz springt das System nach wenigen Perioden auf die äußere Bahn, ohne daß zusätzliche Störungen aufgebracht werden müssen.

- *Eigenschwingung der Surgeamplitude*

Zur Verifikation der Rückstellcharakteristik der jeweiligen Verankerungsmechanik sind Eigenschwingungsversuche durchgeführt worden, bei der die Rückstellkraft als Funktion der Auslenkung registriert wurde. Die dabei aufgezeichnete gedämpfte Schwingung weist eine Periodenvergrößerung der oszillierenden Längsbewegung bei kleiner werdenden Amplituden auf (Abb. 53). Da die Eigenperiode T aus der Rückstellgröße c und der schwingenden Masse m (einschließlich hydrodynamischer Masse) entsprechend $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{c}}$ folgt, läßt sich dieses Phänomen einfach durch die mit kleineren Schwingungsamplituden einhergehende Verringerung der mittleren Steifigkeit erklären.

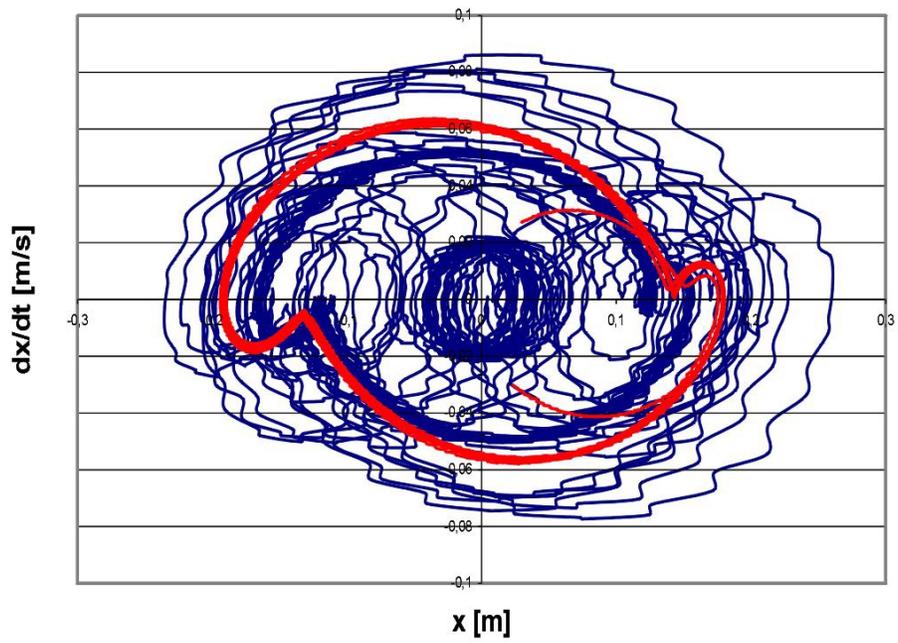


Abb. 52: Änderung der Amplitude bei Erhöhung der Wellenfrequenz

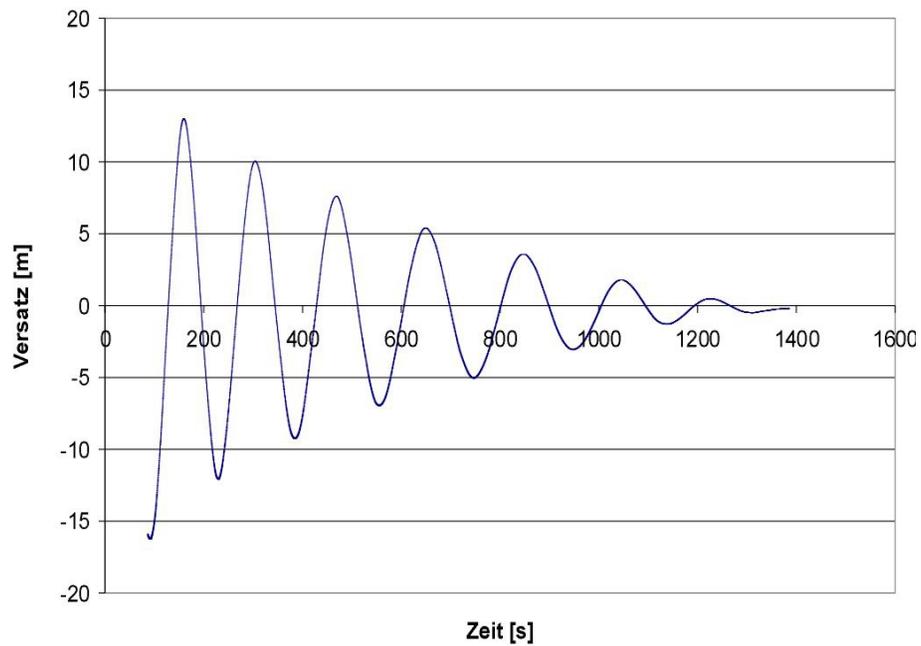


Abb. 53: Eigenschwingung des verankerten Schwimmkranes

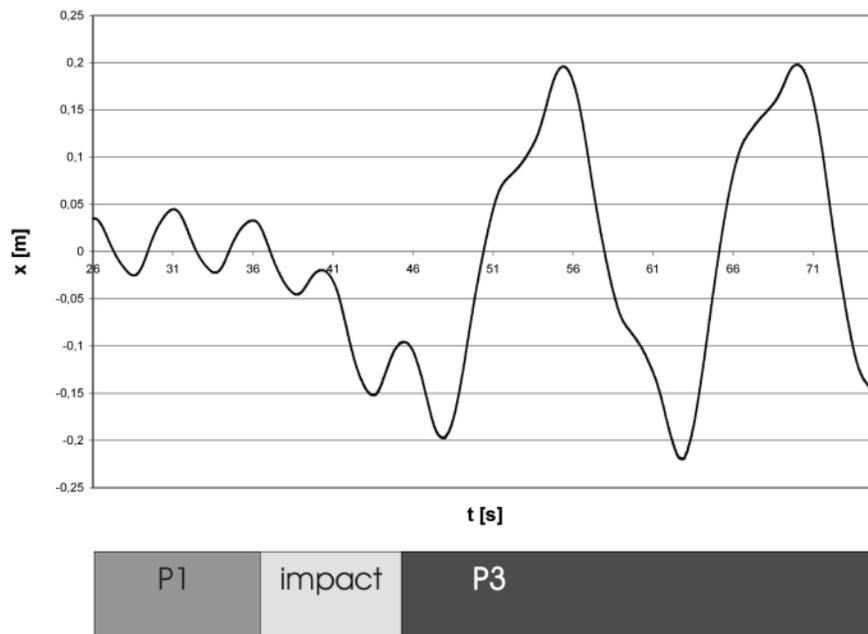


Abb. 54: Übergang von ein- zu dreiperiodischem Verhalten

6 Bewertung

In diesem Kapitel werden die am Institut für Schiffs- und Meerestechnik der TU Berlin durchgeführten experimentellen Untersuchungen der Schwimmkrane bewertet. Die qualitative Interpretation der numerischen Simulation wird von unseren Projektpartnern der TU Hamburg-Harburg durchgeführt. Beispielhaft sind in Abb. 55 Rechnungen einer zwei- bzw. dreiperiodischen Surgebewegung im Vergleich zu Meßwerten aufgetragen. Die Übereinstimmung von Simulation und Experiment ist gut. Aus dieser Verifikation folgt, daß die in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Software für die Prognose nichtlinearer Phänomene von Schwimmkranen geeignet ist. Eine umfangreiche Diskussion von Simulationen ist im Abschlußbericht der TU Hamburg-Harburg zu finden.

Wie die vorgelegten Untersuchungen zeigen, können mehrperiodische Bewegungsformen für alle verankerten Schwimmkrane im Versuch nachgebildet werden. Eine praxisorientierte Relevanz ergibt sich jedoch primär nur für die Kranbarge, da entscheidende Systemparameter für die Verankerungscharakteristik, bei denen diese Bewegungsformen bei dem Kranschiff CASTORO OTTO und dem Kranhalbtaucher THIALF identifiziert werden können, praktisch unrealistisch sind. Die für subharmonische Surgebewegungen erforderlichen hohen Steifigkeiten des Ankersystems sind in der Praxis irrelevant. Für die Kranbarge MAGNUS dagegen werden im Bereich realistischer Seegänge und realistischer Verankerungskräfte subharmonische Bewegungen mit zum Teil dramatischen Auswirkungen auf die auftretenden Kräfte registriert.

Die eingesetzten Bewegungsmeßsysteme auf Basis von Weggebern sind ausreichend genau zur Ermittlung der relevanten und kritischen Bewegungsgrößen geeignet. Bei systematischen Parametervariationen erweist sich der Umbau mechanischer Bewegungsmeßsysteme als zeitaufwendig. Zur Effizienzsteigerung von Messungen wird für zukünftige Untersuchungen ein optisches System zur berührungslosen Bewegungsmessung empfohlen. Die eingesetzten Bewegungsmeßsysteme auf Basis von Beschleunigungsgebern eignen sich zur Ermittlung höherfrequenter Schwingungen, insbesondere von Systemen die vor und nach der Messung eine definierte Nulllage einnehmen. Niederfrequente Bewegungen können durch die Rundungsfehler der numerischen Integrationsverfahren zu einem virtuellen Auswandern des Schwimmkranes führen, der im Fall einer bekannten Ruhelage am Ende

einer Messung durch Trend-Removal korrigiert werden kann. Für *abgebrochene* Messungen sind direkte Meßverfahren – also Verfahren, die die zu ermittelnden Werte direkt registrieren – besser geeignet als solche, die abgeleitete Größen messen.

Aus den experimentellen Untersuchungen können für den Betrieb von Schwimmkränen eine Reihe von Konsequenzen gezogen werden. Mehrperiodische Bewegungsformen sind für sehr große Schwimmkrane in der Realität nicht zu erwarten, da die Parameter natürlicher Seegänge im Zusammenspiel mit den Systemparametern der Schwimmkrane und deren Verankerungen keine kritischen Parameterkombinationen darstellen. Bei kleineren Schwimmkränen – in diesem Vorhaben repräsentiert durch die Kranbarge MAGNUS – ist unter realistischen Betriebsbedingungen durchaus mit mehrperiodischen Bewegungsformen zu rechnen, die zu kritischen Belastungen des Verankerungssystems und zu operationellen Gefahren führen können. Zwei Phänomene sollte hierbei besondere Beachtung geschenkt werden: Der Wechselwirkung von Surgeamplitude und Eigenschwingung (Abschnitt 5.5) sowie die Beziehung zwischen der Periode des erregenden Seegangs und Surgeamplitude der mehrperiodischen Bewegung (Abb. 51). Beide Phänomene könnten als Schlüssel für ein frühzeitiges Erkennen – und folglich Abwenden – einer kritischen Situation dienen. Größere Auslenkungen bedeuten im Zusammenspiel mit nichtlinearen Rückstellkräften eine *Versteifung* des Systems und folglich bei Systemen mit geringer Dämpfung eine Verringerung der Eigenperiode (Abb. 53). Stabile Bewegungszustände besitzen ein definiertes Energieniveau, das geringer ist, als alle benachbarten Zustände. Wird die Frequenz des erregenden Seegangs erhöht, so bleibt der Modus dieser mehrperiodischen Bewegung nur dann stabil, wenn sich die Eigenfrequenz des Systems erhöht, was nur durch Versteifung der Rückstellcharakteristik der Verankerung und somit einer Vergrößerung der Surgeamplitude erreicht werden kann. Dieser Fall wurde im Experiment wiederholbar beobachtet. In der Praxis – regulärer Seegang kommt nur selten vor – bedeutet dies eine entscheidende Gefahr: Hat sich (auch nur kurzfristig) eine subharmonische Bewegungsform mit kleiner Amplitude eingestellt, so kann aus dieser Bewegung heraus durch eine zufällige Sequenz von Wellen mit kleinerer Periode eine Auslenkung des Systems erfolgen, die deutlich über der für diese Wellen zu erwartenden Surgebewegung liegt. Die Belastungen der Verankerung und die resultierenden Beschleunigungen können als Folge zu einem Scheitern der Operation führen.

Als Empfehlung für operationelle Eingriffe zur Verhinderung kritischer Zustände wird ein Ankermanagement in Verbindung mit der in diesem Projekt entwickelten Simulationssoftware empfohlen. Für ein gegebenes Seegangsspektrum – gemessen oder prognostiziert – kann mit Hilfe der entwickelten Software eine Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der überkritische Beschleunigungen oder Auslenkungen auftreten werden. Da in der Verankerungscharakteristik die am einfachsten zu modifizierenden Betriebsparameter des Systems enthalten sind, liegt es nahe, diese Parameter auf die zu erwartenden Betriebsbedingungen in Hinblick auf eine Minimierung der Wahrscheinlichkeit dieser überkritischen Betriebsbedingungen zu optimieren. Nebenbedingungen wie Positioniergenauigkeit sind bei einer solchen Optimierung zu berücksichtigen. Für zukünftige Entwicklungen ist es denkbar, die Simulation durch simultane Messungen zu unterstützen und eine Echtzeitprognose an Bord der Schwimmkrane durchzuführen.

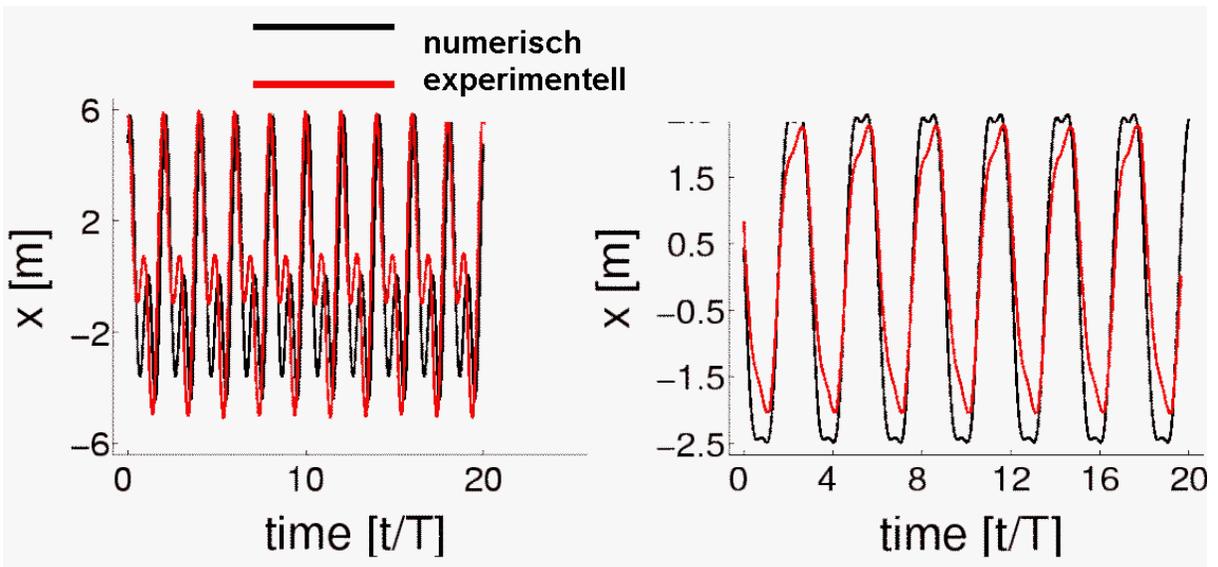


Abb. 55: Vergleich Simulation – Messung

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Verbundvorhabens *Schwimmkrane als technisches Problem der Nichtlinearen Dynamik* – gemeinsam mit der Technischen Universität Hamburg-Harburg und dem Germanischen Lloyd – wurde an der TU Berlin das Teilvorhaben *Experimentelle Validierung der numerischen Simulation* durchgeführt. Für drei repräsentative Schwimmkrantypen – Kranponton, Kranschiff und Kranhalbtaucher – wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen lassen sich die Ergebnisse der nichtlinearen numerischen Simulation validieren.

Schwerpunkte der Untersuchungen lagen in der Identifizierung nichtlinearer Phänomene, insbesondere im Auffinden subharmonischer Bewegungsformen, wobei spezieller Wert auf die Identifizierung kritischer nichtlinearer Rückstellcharakteristiken gelegt wurde. Die Versuchstechnik zur Modellierung nichtlinearer Verankerungssysteme wurde ausgebaut, Programme für den Entwurf vorgegebener Verankerungskennlinien implementiert. Die Meßtechnik und Programme zur Auswertung der langen Registrierungen wurden auf Basis der am Fachgebiet Meerestechnik vorhandenen Technik weiter entwickelt.

Die wichtigsten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind:

- Subharmonische Bewegungsformen können zu Belastungen des Verankerungssystems führen, die um ein Vielfaches höher sind als die der einperiodischen Bewegungen bei identischem Seegang.
- Die – zur Induzierung mehrperiodischer Bewegungsformen – notwendigen Störungen sind in der Größenordnung der Verankerungskräfte der einperiodischen Antwort, nicht in der Größenordnung der Kräfte der mehrperiodischen Bewegung.
- Unter realistischen Betriebsbedingungen sind mehrperiodische Bewegungen nur bei der Kranbarge zu erwarten. Hierfür ist in erster Linie die Größe des Schwimmkranes und die Verankerungscharakteristik ausschlaggebend, nicht die Bauform.
- Durch gezielte Manipulation der Verankerungsparameter läßt sich das Bewegungsverhalten beeinflussen und kritische Bewegungen während des Betriebs verhindern.

Die von den Projektpartnern berechneten Simulationsdaten zeigen gute Übereinstimmung – qualitativ und quantitativ – mit den Versuchsergebnissen. Damit kann die hier entwickelte Software für die Prognose von Kranoperationen zuverlässig eingesetzt werden.

8 Dankwort

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Unterstützung dieses Projektes. Besonderer Dank gilt dem VDI, der die Projektträgerschaft dieses Forschungsvorhabens übernommen hatte und mit der flexiblen Gestaltung der Projektlaufzeit einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Ergebnisse des Vorhabens geleistet hat. Besonders wertvoll war die Zusammenarbeit und der rege Austausch mit unseren Projektpartnern vom Germanischen Lloyd und unserer Projektleitung um Professor Kreuzer von der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Die gute inhaltliche Diskussion und kritischen Fragen, insbesondere der für den Betrieb von Schwimmkränen relevanten Informationen, haben wesentlich zum Gelingen dieses Forschungsvorhabens beigetragen.

Abbildungsverzeichnis

1	Kranbarge MAGNUS	5
2	Kranschiff CASTORO OTTO	6
3	Kranhalbtaucher THIALF	6
4	Balkenplan für das Teilprojekt der TU Berlin	10
5	Koordinatensystem am Beispiel der Barge	12
6	Rückstellkraft eines einzelnen Ankerstranges	14
7	Wirkungsbereich eines Ankerstranges	14
8	Verankerungsarten der verschiedenen Schwimmkrantypen	15
9	Wellenkanal der TU Berlin	16
10	Seitenwandabsorber im Wellenkanal	17
11	Umlenkrollen der Verankerung und des Weggebersystems	18
12	Fehlerberechnung der Weggebermessung	19
13	Beschleunigungsmessrahmen nach Miles	20
14	Entwickeltes Lagereferenzsystem	23
15	Bezugskoordinatensysteme der Bewegungsmessung	23
16	Schema der Installation des Lagereferenzsystems auf der Barge	24
17	Dreikomponentenwaage an der Krannock der Barge	26
18	Parameter der Lastbewegungsmessung unter Verwendung von Weggebern	28
19	Überlagerung von zwei Verankerungssträngen, resultierende Rückstellkraft	28
20	Verschiedene Ruckstellcharakteristiken	29
21	Nockenmechanismus Gewicht und Feder	30
22	Nockenentwurf	31
23	Parameter der neuen Verankerung	32
24	Modell der Kranbarge MAGNUS	33
25	Modell des Kranschiffes CASTORO OTTO	34
26	Fesselungsmechanismus des Kranhalbtauchers	35
27	Modell des Halbtauchers THIALF	36
28	Konstruktionszeichnung des Halbtauchers THIALF	37
29	Versuchsaufbau mit Nockenverankerung	38
30	Verankerung mit Ketten und Federn	38
31	Versuchsaufbau mit obenliegender Verankerung	39

32	Auswertung der Meßdaten	40
33	Verankerungscharakteristik MAGNUS	42
34	Verankerungscharakteristik CASTORO OTTO	42
35	Harte Verankerungscharakteristik THIALF	43
36	Weiche Verankerungscharakteristik THIALF	43
37	Pegel und Längsversatz einer dreiperiodischen Bewegung der Barge	45
38	Ein- und mehrperiodische Bewegungen der Barge	45
39	Verankerungskräfte der ein- und mehrperiodische Bewegungen der Barge	46
40	Ein- und zweiperiodische Längsbewegung der Kranbarge	46
41	Phasendiagramme der ein- und zweiperiodische Längsbewegung der Kranbarge	46
42	Induzierung mehrperiodischer Bewegungszustände durch einseitige Fesselung	47
43	Ein- und zweiperiodische Bewegung des Kranschiffes	47
44	Phasendiagramme der ein- und zweiperiodischen Bewegung des Kranschiffes	48
45	Ein- und dreiperiodische Bewegung des Kranschiffes	48
46	Phasendiagramme der ein- und dreiperiodischen Bewegung des Kranschiffes	48
47	Pegelschriebe und Surgebewegungen des Kranhalbtauchers	49
48	Ein- und dreiperiodische Bewegungen des Kranhalbtauchers, Fourierspektren	50
49	Phasendiagramm der Halbtaucherbewegung	51
50	Kranhalbtaucher bei verschiedenen Seegangsamplituden	51
51	Änderung der Surgeamplitude bei Erhöhung der Wellenfrequenz	52
52	Änderung des Phasendiagrammes bei Erhöhung der Wellenfrequenz	53
53	Eigenschwingung des verankerten Kranhalbtauchers	53
54	Übergang von ein- zu dreiperiodischem Verhalten	54
55	Vergleich Simulation – Messung	56

Literatur

- Y. Chen und G.F. Clauss. Entwicklung vertikaler Wellenabsorber zur Verringerung von Seitenwandreflexionen bei Seegangmodellversuchen. Abschlußbericht TUB/ISM 92/6, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, Fachgebiet Meerestechnik, Technische Universität Berlin, Dezember 1992.
- G.F. Clauss und T. Riekert. Operational limitations of offshore crane vessels. In *OTC 6217*, Houston, 1990.
- G.F. Clauss und T. Riekert. Influence of load motion control on the operational limitations of large crane vessels in severe environment. In *Proceedings of the International Conference on Behaviour of Offshore Structures (BOSS)*, S. Vol.2, 1112–1125, London, 1992.

- G.F. Clauss, T. Riekert, und Y. Chen. Improvement of seakeeping model tests by using the wave packet technique and side wall wave absorbers. In *OMAE 92 - 507*, S. 659–666, Volume I–B, Calgary, June 1992.
- G.F. Clauss und M. Vannahme. An experimental study of the nonlinear dynamics of floating cranes. In *Proc. of the Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, Vol. III, S. 511–518, Brest, France, 1999.
- G.F. Clauss, M. Vannahme, K. Ellermann, und E. Kreuzer. Subharmonic Oscillations of Moored Floating Cranes. In *Proc. of the Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, may 2000. 11953.
- K. Ellermann. Experimentelle Verzweigungsanalyse der Dynamik eines Schwimmkranmodells. Master's thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 1998.
- T. Jiang. Untersuchung nichtlinearer Schiffsdynamik mit Auftreten von Instabilität und Chaos an Beispielen aus der Offshoretechnik. Techn. Bericht 512, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1991.
- T. Jiang, T.E. Schellin, und S.D. Sharma. Manoeuvring simulation of a tanker moored in a steady current including hydrodynamic memory effects and stability analysis. In *RINA International Conference on Ship Manoeuvrability*, London, 1987.
- R. Kral, E. Kreuzer, und C. Wilmers. Nonlinear oscillations of a crane ship. In *Proc. of 3rd Int. Conf. on Industrial and Applied Mathematics*, Hamburg, 1996.
- E. Kreuzer. *Numerische Untersuchung nichtlinearer dynamischer Systeme*. Springer-Verlag, 1997.
- E. Kreuzer und K. Ellermann. Moored Crane Vessels in Regular Waves. In *Proceedings of the IUTAM Symposium, Recent Developments in Non-Linear Oscillations of Mechanical Systems*, Hanoi, Vietnam, 1999.
- E. Kreuzer und A. Mohr. Nonlinear dynamics of a moored crane barge in regular waves. In J.H. Vugts, Editor, *Proceedings of the 8th International Conference on the Behaviour of Offshore Structures (BOSS '97)*, London, 1997. Elsevier-Science.
- N.R. Maddox. An Energy Basis for the Design of Open-Ocean Single-Point Moorings. In *OTC 1536*, S. 255–266, Houston, 1972.
- M.D. Miles. Measurement of six degree of freedom model motions using strapdown accelerometers. In *21st American Towing Tank Conference, Washington*, National Academy Press, Washington, D.C., 5-7 August 1986.
- J.N. Newman und P.D. Slavounos. The computation of wave loads on large offshore structures. In *Proceedings of BOSS Conference*, S. 605–622, 1988. Trondheim, Norway.
- T. Riekert. *Die Dynamik von Schwimmkränen mit hängender Last*. Dissertation, Technische Universität Berlin (D 83), ISBN 3-89249-140-2, Verlag René F. Wilfer, Spardorf, 1992.
- T.E. Schellin, T. Jiang, und C. Östergaard. Response Analysis and Operating Limits of Crane Ships. *Journal of Ship Research*, S. 225–238, September 1993.