TECHNISCHE MECHANIK 9(1988)Heft 4
Manuskripteingang: 25. 05. 1988

Methoden der experimentellen Parameteridentifizierung zur Ermittlung dynamischer Eigenschaften und zur Automatisierung gesteuerter Objekte der Meerestechnik

Dieter Puls, Jürgen Majohr, Helmut Papenfuß

1. Einleitung

In der Meerestechnik werden in großem Umfang schwimmende, sich selbst bewegende und gesteuerte Objekte, wie z. B. Über- und Unterwasserschiffe, zum Teil mit geschlepptem Anhang, bemannte und unbemannte Tauchkörper und Unterwassergeräteträger eingesetzt. Die Steuerung ihrer Bewegungen kann sowohl manuell wie auch automatisch erfolgen. Im Rahmen langfristiger Untersuchungen [1] eines größeren Kollektivs erarbeiten die Autoren aufeinander abgestimmte Methoden der Hydrodynamik zur Aufklärung grundsätzlicher Zusammenhänge über Starrkörperbewegungen in Flüssigkeiten, der rechnergestützten Simulation von Körperbewegungen, der experimentellen Parameteridentifizierung bei gesteuerten Körperbewegungen zur Ermittlung dynamischer Eigenschaften konkreter Objekte und zur Automatisierung von Prozessen im Zusammenhang mit der Steuerung der Körperbewegungen. Die Ergebnisse in Form von physikalisch-mathematischen Modellen, Identifikations- und Simulationsmethoden werden multivalent angewendet.

Bei der Projektierung und beim Entwurf der Objekte werden sie benötigt, um solche Körperformen, Antriebs- und Manövriersysteme festzulegen, welche die Ausführbarheit von zeit- und/oder energieoptimalen Bewegungen bei Aufgaben der Bahn- und Richtungssteuerung, die Einhaltung gewisser Grenzwerte von Bewegungsamplituden, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen und die Sicherheit der Objekte gewährleisten. Hinsichtlich der Automatisierung bei der Steuerung der Bewegungen liefern die Untersuchungen prozeßanalytische Grundlagen zur Modellierung der Systeme und zur experimentellen Identifikation von Modellparametern bereits während des Entwurfes von aotomatisierten Anlagen aber auch während des Betriebes.

Bei der Bewegungssimulation mit dialogfreundlichen Rechnern werden die Ergebnisse eingesetzt, um Entscheidungsfindungen der Bedienungsmannschaften für geplante Manöver vorzubereiten, sie werden benötigt, um Fahrtrainer aufzubauen und auch, um damit Aufgaben des CAD zu lösen.

Ausgehend von den allgemeinen Kirchhoffschen Bewegungsgleichungen für die Bewegung starrer Körper in Flüssigkeiten sind die für die einzelne Problemklassen gültigen Bewegungsgleichungen und Lösungsmethoden abgeleitet worden.

Während die explizite Darstellung der hydrodynamischen Trägheitskräfte in den Gleichungen durch Einführung der Kelvinschen Impulse bei Verwendung hydrodynamischer Massen für reibungsfreie Flüssigkeit grundsätzlich gelingt, ist die theoretische Ermittlung der die Bewegung verursachenden hydrodynamischen Kräfte, vor allem infolge von Zähigkeit, Wirbeln und Wellen für längere Zeit offensichtlich nicht möglich. Die Theorie liefert jedoch ausreichende Aussagen zur Struktur der Bewegungsgleichungen für die verschiedensten Anwendungsfälle, nützliche Hinweise auf die Stabilität und den qualitativen Verlauf von Lösungen sowie weiterhin orientierende Aussagen zum Einfluß wichtiger Systemparameter auf die Bewegungseigenschaften. Es ist möglich, Fragestellungen an Experimente zu stellen.

Von den Autoren wurden weiterhin geeignete theoretische Methoden für die experimentelle Parameteridentifizierung entwickelt und angewendet. Neben der benötigten Software wurden Hardwarelösungen geschaffen. Im Rahmen von Modell- und Großversuchen erfolgte eine Überprüfung der theoretischen Ergebnisse. Bezüglich der dargelegten Anwendungen beschränken sich die Ausführungen auf gesteuerte Schiffsbewegungen. Weitere Resultate über gesteuerte Unterwasserfahrzeuge sind in [10] zu finden.

2. Theoretische Grundlagen zur Behandlung gesteuerter Körperbewegungen

Für die Bewegungen der als starre Einzelkörper betrachteten Objekte im Wasser gelten die Kirchhoffschen Bewegungsgleichungen. Sie lauten für ein körperfestes kartesisches x,y,z-Koordinatensystem bei Vorhandensein einer Translationsbewegung mit der Geschwindigkeit $\overline{u} = iu_x + ju_y + ku_z$ und einer Rotationsbewegung $\overline{\omega} = i\omega_x + j\omega_y + k\omega_z$ relativ zu einem raumfesten System in Komponentenschreibweise

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E}{\partial u_x}\right) + \omega_y \frac{\partial E}{\partial u_z} - \omega_z \frac{\partial E}{\partial u_y} = F_x \tag{1.1}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E}{\partial u_y}\right) + \omega_z \frac{\partial E}{\partial u_x} - \omega_x \frac{\partial E}{\partial u_z} = F_y \tag{1.2}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E}{\partial u_z}\right) + \omega_x \frac{\partial E}{\partial u_y} - \omega_y \frac{\partial E}{\partial u_x} = F_z \tag{1.3}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E}{\partial \omega_x}\right) + \omega_y \frac{\partial E}{\partial \omega_z} - \omega_z \frac{\partial E}{\partial \omega_y} + u_y \frac{\partial E}{\partial u_z} - u_z \frac{\partial E}{\partial u_y} = M_x \tag{1.4}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E}{\partial \omega_y}\right) + \omega_z \frac{\partial E}{\partial \omega_x} - \omega_x \frac{\partial E}{\partial \omega_z}$$

$$+ u_z \frac{\partial E}{\partial u_x} - u_x \frac{\partial E}{\partial u_z} = M_y \qquad (1.5)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E}{\partial \omega_z}\right) + \omega_x \frac{\partial E}{\partial \omega_y} - \omega_y \frac{\partial E}{\partial \omega_x} + u_x \frac{\partial E}{\partial u_y} - u_y \frac{\partial E}{\partial u_x} = M_z \qquad (1.6)$$

Translations- und Rotationsbewegungen sind untereinander gekoppelt. In den auf der linken Seite der Gleichungen aufgeführten Trägheitskräften ist E die Gesamtenergie des aus dem Körper und der umgebenden Flüssigkeit bestehenden Systems. Nach allen bisher bekannten Anwendungen auf gesteuerte Körperbewegungen ist es zulässig, die kinetische Energie der Flüssigkeit mit Hilfe von hydrodynamischen Massen, hydrodynamischen Trägheitsmomenten usw., die für reibungsfreie Flüssigkeit definiert sind, auszudrücken [1]. Die Lösung der damit verbundenen Randwertprobleme gelingt mit modernen Methoden der Potentialtheorie für praktisch beliebige Körperformen, z. B. [2], [3], solange bei Bewegungen an der freien Wasseroberfläche die Wellenbildung nicht zu stark die Körperumströmung beeinflußt.

Die Schwierigkeiten des Problems bestehen in der Bestimmung der äußeren Kräfte und Momente infolge von Zähigkeit und Wirbeln, die die Bewegung verursachen. Sie sind abhängig von der Körperform, der Form der Bahn und der relativen Lage des Körpers zur Bahn sowie vom Betriebszustand der Vortriebs- und Manövrierorgane. Selbst für relativ einfache Körperformen, wie bei Unterseebooten, Raketen und Flugzeugrümpfen ist eine theoretische Lösung noch nicht möglich [4].

Mit zweckmäßigen Vereinfachungen zur Körpergeometrie, zur Kinematik der Bewegungen und zu den Eigenschaften der Flüssigkeit lassen sich jedoch wichtige Sonderfälle behandeln. Für Bewegungen von Verdrängungsschiffen läßt sich zeigen, daß die Translationsbewegung in vertikaler Richtung und die Rotationsbewegung um die Querachse, Bild 1, nach entkoppelten Bewegungsgleichungen zu ermitteln sind. Die verursachenden Kräfte lassen sich mit Methoden für reibungsfreie Flüssigkeiten sicher berechnen [5].

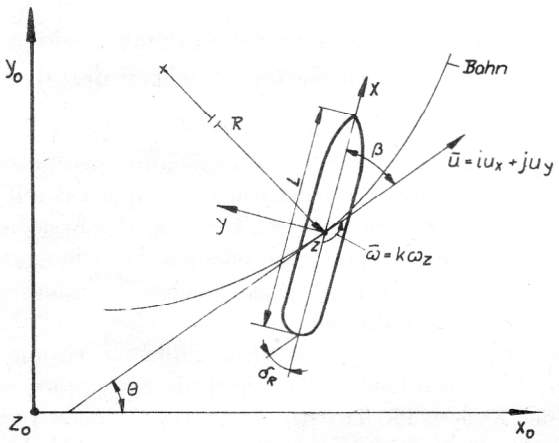


Bild 1
Körper- und raumfestes Koordinatensystem und wichtigste Größen

Für die Ermittlung der Bewegungen in den übrigen Freiheitsgraden stehen dann unter Verwendung der in Bild 1 erklärten Größen die Gleichungen (2.1) bis (2.5) zur Verfügung.

$$m\left(\frac{du}{dt}\cos\beta - u\sin\beta\,\frac{d\beta}{dt}\right) + mu^2 \sin\beta \cdot \frac{1}{R} = F_x \qquad (2.1)$$

$$-m\left(\frac{du}{dt}\sin\beta + u\cos\beta\,\frac{d\beta}{dt}\right) + mu^2 \cos\beta \cdot \frac{1}{R} = F_y \qquad (2.2)$$

$$J_z \frac{d}{dt}\left(\frac{U}{R}\right) = M_z \qquad (2.3)$$

$$J_x \frac{d^2\varphi}{dt^2} + mu^2 \frac{Z_G}{R} = M_x \qquad (2.4)$$

$$2\pi J_{x_p} \frac{dn}{dt} = M_M - M_P \qquad (2.5)$$

Neben den in der Darstellung angegebenen drei Freiheitsgraden der Bewegung ist noch die Rollbewegung mit dem Winkel φ um die x-Achse zugelassen. Die Gleichung (2.5) beschreibt das Momentengleichgewicht an der Propellerwelle.

n ist die Propellerdrehzahl, M_M das Motor- und M_P das Propellermoment. Für einzelne Schiffe ist es gelungen, nach aufwendigen Kraftmessungen an Modellen und zweckmäßiger Darstellung der Ergebnisse für numerische Rechnungen die Bewegungsgleichungen zu lösen und auch Stabilitätsuntersuchungen anzustellen [6], [7].

Die dimensionslose Darstellung der hydrodynamischen Kräfte und Momente durch Beiwerte C_j, etwa in der Form

$$C_j = \sum_{i=1}^{N} a_i \beta^{ki}\, \Omega^{li}\, \delta_R^{mi}\, n^{ni}\, \varphi^{pi} \qquad (3)$$

wobei Ω eine dimensionslose Bahnkrümmung und δ_R der Ruderwinkel ist, zeigt ausgeprägte nichtlineare Abhängigkeiten von den angegebenen Größen.

Es stellte sich heraus, daß der Rollwinkel φ nur bei schnellen Schiffen oder bei Schiffen mit ungewöhnlich hoch liegendem Massenschwerpunkt größeren Einfluß auf das Stabilitäts- und Bewegungsverhalten hat.

Für einen großen Bereich von Anwendungen und auch für qualitative Untersuchungen ist es somit zulässig, den Rollwinkeleinfluß auf die Bewegungen zu vernachlässigen. Es gelten dann in dimensionsloser Darstellung für die Translationsbewegung in der Ebene der ungestörten Wasseroberfläche und die Drehung um die Hochachse die Gleichungen

$$k_x \frac{u'}{u}\cos\beta - k_x \beta' \sin\beta + k_y \Omega \sin\beta = C_x \qquad (4.1)$$

$$-k_y \frac{u'}{u}\sin\beta - k_y \beta' \cos\beta + k_x \Omega \cos\beta = C_y \qquad (4.2)$$

$$k_z \frac{u'}{u}\Omega + k_z \Omega' = C_m \qquad (4.3)$$

Die Gleichungen sind dimensionslos gemacht worden mit dem Staudruck der Relativströmung zum Schiff und einer charakteristischen Fläche, in der Momentengleichung zusätzlich mit einer charakteristischen Länge.

Durch „′" werden im folgenden Differentiationen nach der dimensionslosen Zeit τ gekennzeichnet
($d\tau = (U/L)dt$).
Völlig analog lassen sich auch die Bewegungsgleichungen für die horizontale Bewegung von Unterwasserfahrzeugen ableiten [10].
Mit vereinfachenden Annahmen zur Schiffsform und zum Einfluß von Zähigkeit und Wirbeln ist es durch Anwendung wirbeltheoretischer Methoden für dünne und mäßig dicke Flügel auf Propeller, Düsen und Ruder und durch Anwendung des Impulssatzes auf die als hydrodynamisch schlank betrachteten Schiffskörper gelungen, qualitativ richtig die äußeren Kräfte und Momente zu bestimmen. Ergänzt durch empirische [8] und experimentelle Untersuchungen [9] sind weitgehend allgemeingültige qualitative Angaben zum Stabilitäts- und Bewegungsverhalten von Schiffen zu erzielen. Für ausgewählte Schiffstypen sind bereits quantitativ zutreffende Angaben möglich. Mit Hilfe von Rechnern werden Simulationsuntersuchungen durchgeführt.
Schwierigkeiten für die Theorie bestehen vor allem im nichtlinearen Anstellwinkelbereich für die Kräfte und Momente am Schiffskörper, bei stark instationären Vorgängen und bei der Ermittlung der Wechselwirkung von Propeller und Schiffsrumpf wegen der starken Zähigkeitseinflüsse im Bereich des Schiffshecks.
Für Bewegungen in der Nähe der geraden Bahn, die vor allem bei seegehenden Schiffen den größten Anteil während ihrer Fahrten darstellen, lassen sich die Gleichungen (4) weiter vereinfachen. Da die Geschwindigkeitsänderungen, die Gierwinkel und Bahnkrümmungen klein bleiben, entkoppeln sich die Bewegungsgleichungen. In den Gleichungen (4.2), (4.3) sind die Glieder mit den Geschwindigkeitsänderungen von zweiter Ordnung klein gegenüber den anderen. Ihre Vernachlässigung führt nach Umformung der Beziehungen und Linearisierung der äußeren Kräfte und Momente bezüglich des Gierwinkels, der Bahnkrümmung und des Ruderwinkels auf zwei Schwingungsgleichungen für β und Ω.

$$\Omega'' + 2a\,\Omega' + b\,\Omega = k_1\,\delta_R + k_2\,\delta'_R \qquad (5.1)$$

$$\beta'' + 2a\,\beta' + b\,\beta = k_3\,\delta_R + k_4\,\delta'_R \qquad (5.2)$$

Die Koeffizienten a, b, $k_1 \ldots k_4$ enthalten die explizit bestimmbaren Kraft- und Momentenanstiege von C_y und C_m über β und Ω.
Die Lösungen von (5) für konstant gehaltenen Ruderwinkel, die Auskunft über die Bewegungsstabilität, in diesem Fall als Gierstabilität bezeichnet, geben, lauten

$$\Omega(\tau) = \Omega_0 + \Omega_1\,e^{p_1\tau} + \Omega_2\,e^{p_2\tau} \qquad (6.1)$$

$$\beta(\tau) = \beta_0 + \beta_1\,e^{p_1\tau} + \beta_2\,e^{p_2\tau} \qquad (6.2)$$

p_1, p_2 sind bei Schiffen und auch vielen Klassen von Unterwasserfahrzeugen reelle Wurzeln. Das Vorzeichen der Wurzel p_1 entscheidet über die Stabilität der Bewegung.
Für Aufgaben der Kurssteuerung und der Automatisierung der Steuerung ist es zweckmäßig, in die Gleichung (5.1) mit der Beziehung $\Omega = \Theta'$ den Kurswinkel einzuführen, so daß sich unter Verwendung der an Bord direkt zu messenden Größe Θ ergibt

$$\Theta''' + 2a\,\Theta'' + b\,\Theta' = k_1\,\delta_R + k_2\,\delta'_R \qquad (7)$$

Für gierstabile Schiffe kann eine in der Automatisierungstechnik häufig angewendete, weiter vereinfachte Gleichung in der Form

$$T_s\,\Theta'' + \Theta' = K_s\,\delta_R \qquad (8)$$

benutzt werden. Die Gleichungen (4) bis (8) und ihre Lösungen sind Grundlage für die Bearbeitung von Entwurfs-, Simulations- und Automatisierungsaufgaben. Bezüglich der Automatisierung wurde von den Autoren das Problem der Kursregelung für Bewegungen in der Nähe der geraden Bahn bearbeitet. Die in den Gleichungen (5) bis (8) benötigten Koeffizienten können sich bei Schiffen infolge von Ladungsveränderungen, Bewuchs an der Außenhaut, Änderung des Betriebszustandes der Vortriebsorgane usw. ändern. Um im Bordbetrieb ihre sichere Ermittlung vornehmen zu können, wurden Methoden der experimentellen Parameteridentifizierung entwickelt und angewendet. Ergänzend dazu erfolgte eine Anwendung im schiffbaulichen Versuchswesen, um systematische Untersuchungen über den Einfluß jener Parameter durchzuführen, die bei Schiffen nicht oder nur in engen Grenzen gezielt zu verändern sind. Dazu gehören u. a. Parameter zur Charakterisierung der Körperform, der Wassertiefe und der Schwimmlage. Bei Anwendung der Parameteridentifizierung auf Schiffe und ihre Modelle ergibt sich die für die Hydrodynamik bisher nicht vorhandene Möglichkeit, hydrodynamische Kräfte und Momente mit denselben experimentellen Methoden an beiden Objekten zu ermitteln und damit insbesondere den Reynoldszahleinfluß zu studieren.
Die bisherige Beschränkung der experimentellen Parameteridentifizierung auf lineare Eingrößensysteme erfolgte aus mehreren Gründen. Die in linearen Gleichungen ermittelten Koeffizienten lassen direkt eine physikalisch plausible Deutung zu. Für die notwendigen, sehr genauen Messungen der Ein- und Ausgangsgrößen des Systems stehen an Bord von Schiffen nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten zur Verfügung. Schließlich sind bisher Kenntnisse über die ständig vorhandenen Störungen, vor allem infolge von Wind und von Wind erzeugter Wellen, unzureichend.

3. Methoden der experimentellen Parameteridentifizierung bei gesteuerten Objekten der Meerestechnik

Die experimentelle Parameteridentifikation maritimer Fahrzeuge geht von der gemessenen Reaktion auf zeitabhängige Anregungen aus. Die Erregung des Systems erfolgt über das Manövrier- und/oder das Antriebsorgan des Objektes. Die Erregersignale können determiniert oder statistischer Natur sein.
Gegenwärtig stellt die Parameteridentifikation ein umfangreiches, eigenständiges Teilgebiet der Systemtheorie und der Kybernetik dar, das durch eine Vielzahl von Identifikationsverfahren gekennzeichnet ist [11] bis [15].
Zur Gewinnung eines Überblicks über Verfahren, die für die Bestimmung der Steuereigenschaften von Schiffen

Tabelle 1
Klassifikation der angewendeten und entwickelten Identifizierungsverfahren

Gruppe I	Auswertung von Antwortfunktionen auf determinierte aperiodische Signale (z. B. sprungförmige, d. h. Messung der Übergangsfunktion)
Gruppe II	Auswertung von Antwortfunktionen auf periodische Testsignale (z. B. sinusförmige, d. h. Messung des Frequenzgangs)
Gruppe III	Modellabgleichsverfahren (z. B. mittels adaptivem/selbstabgleichendem Parallelmodell)
Gruppe IV	Korrelationsanalyse mittels natürlicher oder stochastischer Testsignale
Gruppe V	„Moderne" statistische Parameterschätzverfahren

und anderen Objekten der Meerestechnik geeignet sind, erfolgt deren Klassifizierung nach Art des Testsignalverlaufes für die Anregung (sh. Tab. 1). Die Verfahren nach den Gruppen I, II und III arbeiten mit zeitlich determinierten Testsignalen. Dazu muß das mathematische Systemmodell eindeutig bekannt sein.

Die Korrelationsanalyse und die Parameterschätzmethoden (Gruppen IV und V) lassen die Verwendung stochastischer Eingangssignalverläufe sowie stochastischer Systemmodelle, z. B. stochastische Differentialgleichungen, zur Implementierung statistischer System- und Meßstörungen zu.

Deterministische Verfahren kommen dann zum Einsatz, wenn schwach gestörte Objekte wie unter Laborbedingungen identifiziert werden sollen. Sind jedoch nur stärker gestörte Meßwerte verfügbar, bieten Parameterschätzverfahren Vorteile. Sie ermöglichen zudem die Verwendung einer pseudostochastischen Anregung, wodurch nur geringe Abweichungen vom Normalbetriebszustand des Systems verursacht werden.

Der gegenwärtige Stand der Forschung – initiiert durch Arbeiten zur Automatisierung des Schiffsbetriebes – ist durch die umfassende Entwicklung von Methoden zur Parameteridentifikation für lineare Bewegungsgleichungen und die Darstellung des maritimen Fahrzeuges als Eingrößensystem gekennzeichnet. Daneben gibt es erste Ansätze sowohl bei den eigenen Arbeiten als auch in der Literatur zur Identifikation solcher Objekte als Mehrgrößensysteme [26].

Die mathematische Modell-struktur richtet sich nach den meßtechnischen Möglichkeiten. Je weniger Informationen über ein System vorliegen, desto einfacher muß das mathematische Modell gewählt werden, wodurch zwangsläufig auch dessen Gültigkeitsbereich eingeengt wird. Hierzu wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Einfache Modelle haben den Vorteil, daß ihre Parameter mit physikalisch anschaulichen Kriterien bewertbar sind. Sie ermöglichen die Berücksichtigung von theoretisch und empirisch gewonnenen Apriori-Informationen. Der Gültigkeitsbereich einfacher Modellstrukturen läßt sich erweitern, wenn statt konstanter Parameter arbeitspunktabhängige Größen eingeführt werden.

Durch Anwendung rekursiver Schätzalgorithmen kann die on-line-Identifizierung erfolgen. Die ermittelten parametrischen Modelle lassen sich direkt in Regleralgorithmen implementieren. Wesentlich ist, daß außer den Systemparametern der gesteuerten Objekte Störsignalmodelle für mittelwertfrei anzunehmende Störgrößen geschätzt werden können.

Für die schnelle Durchführung der Systemidentifizierung mit Hilfe von Digitalrechnern, deren Funktion durch die zeitserielle Verarbeitung von Datenfolgen charakterisiert ist, wird die Überführung der zeitkontinuierlichen mathematischen Modelle, z. B. der Differenzengleichungen (5) bis (8), in entsprechende zeitdiskrete Modelle, das sind u. a. Differentialgleichungen und diskrete z-Übertragung-funktionen, mittels der z-Transformation vorgenommen [22].

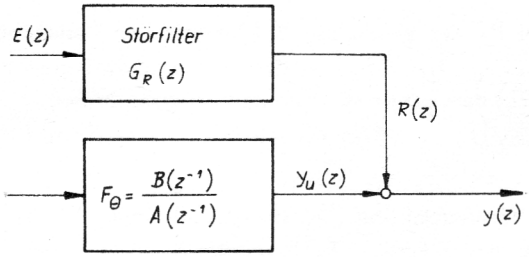


Bild 2
Stochastisch gestörtes System

Für stochastisch gestörte Systeme gilt die Darstellung nach Bild 2. Die dem ungestörten Systemausgang $y_u(z)$ additiv hinzugefügte „farbige" Störgröße $R(z)$ ist über ein Störfilter mit der Übertragungsfunktion $G_R(z)$ aus mittelwertfreiem, nichtkorreliertem (weißen) Rauschen $E(z)$ generiert. Der Modellausdruck lautet somit

$$y(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(z) + G_R(z) \cdot E(z) \qquad (9)$$

Der erste Summand in Gleichung (9) entspricht dem störungsfreien Fall.

Es ist $$B(z^{-1}) = \sum_{1}^{n} b_\nu z^{-\nu}$$

$$A(z^{-1}) = 1 + \sum_{1}^{n} a_\nu z^{-\nu}$$

Die Ansätze für das Störfiltermodell werden in Abhängigkeit vom Schätzverfahren gewählt, um erwartungstreue Parameterschätzwerte zu erzielen. Insbesondere zur Darstellung von Wind und Wellen sind bisher jedoch noch nicht immer zufriedenstellende Resultate erzielt worden.

Die Verwendung des allgemeinen Ansatzes

$$G_R(z) = \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1}) \cdot C(z^{-1})} \qquad (10)$$

brachte erste akzeptable Ergebnisse [23].

Das Ziel der Parameteridentifizierung ist dann erreicht, wenn die durch den gewählten Algorithmus geschätzten Modellparameter zu einem Extremwert (meist Minimum) einer Verlustfunktion unter Verwendung von Fehlergrößen führt. Zur Ermittlung von Fehlergrößen werden Größen am Systemausgang des tatsächlichen Objektes und des mathematischen Modells bei gleichem Systemeingang verglichen.
Zur Gewährleistung der linearen Abhängigkeit der Fehlergröße von den Prozeßparametern wurde der Gleichungsfehler oder verallgemeinerte Fehler

$$E(z) = \hat{A}_M(z^{-1}) \cdot y(z) - \hat{B}_M(z^{-1}) \cdot u(z) \qquad (11)$$

bzw. im Zeitbereich

$$e(k) = y(k) - y(k/k-1) \qquad (12)$$

= neue Beobachtung zum Zeitpunkt k
– Einschrittvorhersage des Modells ausgehend von Messungen bis zum Zeitpunkt (k – 1)

gewählt. Damit gilt dann

$$e(k) = y(k) - \hat{\underline{PV}} * \underline{MV}^T(k) \qquad (13)$$

wobei $\hat{\underline{PV}}$ der geschätzte Vektor mit den Parametern $[a_1 \ldots a_n, b_1 \ldots b_n]$ für das gesteuerte System ist und $\underline{MV}^T(k)$ den Vektor der Ein- und Ausgangsgrößen $[-y(k-1) \ldots -y(k-n), u(k-1) \ldots -u(k-n)]$ darstellt.

Die Verlustfunktion für die grundlegende Schätzmethode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-square-LS) lautet dann

$$V = \sum_{k=m}^{m+n} e^2(k) \qquad (14)$$

Durch Minimisierung der Verlustfunktion (14) ergibt sich die nichtrekursive Schätzgleichung für das Least-square-Verfahren

$$\hat{\underline{PV}} = [\underline{MM}^T * \underline{MM}]^{-1} * \underline{MM}^T \cdot \underline{y} \qquad (15)$$

mit MM = Meßwertmatrix mit den Spalten $\underline{MV}^T(k)$
$\underline{y}$ = Vektor der Ausgangsgrößen

Für Echtzeitidentifizierung wird die rekursive Methode der kleinsten Quadrate (RLS) angewendet.

$$\hat{\underline{PV}}(k+1) = \hat{\underline{PV}}(k) + \underline{K}(k+1)\,[\underline{y}(k+1) - \underline{MV}^T(k+1)\,\hat{\underline{PV}}(k)] \qquad (16)$$

mit dem Korrekturvektor

$$\underline{K}(k+1) = \underline{P}(k)\,\underline{MV}(k+1)\,[1 + \underline{MV}^T(k+1)\,\underline{P}(k)\,\underline{MV}(k+1)] \qquad (17)$$

und der Präzessionsmatrix

$$\underline{P}(k+1) = [\underline{I} - \underline{K}(k)\,\underline{MV}^T(k+1)\,\underline{P}(k)] \qquad (18)$$

Die Least-square-Schätzung ergibt nur im Fall eines nichtkorrelierten Gleichungsfehlers eine erwartungstreue Schätzung. Dies setzt bei der Schätzung eines gestörten Prozesses eine spezielle Störfilterannahme

$$G_R = \frac{1}{A} \qquad (19)$$

voraus, was unter praktischen Bedingungen meist nicht gegeben ist. Insofern ist die Least-square-Methode nur für Prozesse mit kleinem Stör-Nutzsignalverhältnis geeignet.
Die Methode der Instrumentellen Variablen (RIV) führt, ohne daß eine Störfilterannahme erforderlich ist, zu einer erwartungstreuen Schätzung. Dazu wird ein Hilfsvariablenvektor $\underline{W}(k)$ eingeführt, der eng mit den Nutzsignalanteilen im Meßwertvektor $\underline{MV}(k)$ korreliert ist und der letzteren in der rekursiven Gleichung (16) ersetzt.
Weiterhin kann durch spezielle Störfilterannahmen auch bei farbigem Gleichungsfehler eine erwartungstreue Schätzung erreicht werden.
Bei Zugrundelegung des allgemeinen Störfilteransatzes nach Gleichung (10) und Einsetzen in die Modellgleichung (9) für das gestörte System ergibt sich die folgende Beziehung für den Gleichungsfehler

$$y(z)\ A(z^{-1}) - u(z)\ B(z^{-1}) = \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})}\,E(z)\,. \qquad (20)$$

Daraus folgt eine erwartungstreue Schätzung für

$$y^*(z)\ A(z^{-1}) - u^*(z)\ B(z^{-1}) = E(z) \qquad (21)$$

wenn gefilterte Meßgrößen

$$y^* = y\,\frac{C}{D} \quad \text{und} \quad u^* = u\,\frac{C}{D} \qquad (22)$$

verwendet werden.
Es wurde in Anlehnung an Spriet [24] die Methode der erweiterten Instrumentellen Variable (refined RIV, RIV–R) entwickelt, die Systempolynome A und B ausgehend von den gefilterten Meßgrößen schätzt. Die Störpolynome C und D werden gesondert mit der RLS-Methode bestimmt. Es wird nachgewiesen, daß diese Methode spezielle Algorithmen der Maximum Likelihood-Schätzmethode repräsentiert, so daß neben der asymptomatischen Erwartungstreue auch die minimale Varianz der geschätzten Parameter garantiert ist [23].
Eine Polynomreduktion in $A(z^{-1})$ zur Herauslösung des Integralanteils für das integrale Kursverhalten des Schiffes wurde vorgenommen (RIV-RI-Schätzmethode).

4. Versuchs-, Meß- und Rechentechnik zur Lösung der Aufgabe

Zur Überprüfung der theoretischen Ergebnisse wurden systematische Experimente mit Schiffsmodellen und Schiffen durchgeführt.
Mit mehreren gefesselten Modellen, die unterschiedliche Gierstabilität aufweisen, sind in den Versuchsanlagen der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock Kraftmessungen auf geraden und gekrümmten Bahnen vorgenommen worden. Unter Verwendung der Meßergebnisse erfolgten Bewegungsrechnungen. Diese Ergebnisse dienten zum

Vergleich mit den Resultaten aus Freifahrtversuchen mit denselben Modellen und mit Schiffen, um die Genauigkeit und den Gültigkeitsbereich von Lösungen verschiedener Typen von Bewegungsgleichungen zu überprüfen. Sie sind weiterhin Grundlage zur Erprobung von Identifizierungsmethoden bei Systemen ohne Störung.

Für die Großversuche konnte das Ausbildungsschiff der Ingenieurhochschule für Seefahrt Warnemünde/Wustrow für Fahrten in der Ostsee ausgerüstet und genutzt werden.

Zur Ergänzung vorhandener Meßtechnik wurden vor allem Vorrichtungen zur Messung des Gierwinkels und der Kurswinkelgeschwindigkeit bei freifahrenden Modellen entwickelt. Die Ermittlung der Kurswinkelgeschwindigkeit erfolgt mit einem System gekoppelter Kreisel, einem Wendezeiger, der auch bei Großversuchen eingesetzt wurde. Zur genauen Bahnvermessung im küstennahen Bereich ist erstmals ein Infrarotgerät erfolgreich erprobt worden [25].

Die registrierten Meßdaten wurden zur Lösung von Identifizierungsaufgaben mit einem speziell entwickelten Rechner im on-line-Prozeß erfaßt und verarbeitet [26].

Für die Lösung von Simulationsaufgaben wurden Rechner verschiedenen Typs eingesetzt. Umfangreiche numerische Experimente unter Verwendung vollständiger Bewegungsgleichungen erfolgten auf einer Anlage vom Typ ES 1056. Für die Nutzer aus der Praxis wurde vor allem Software für Mikrorechner entwickelt.

5. Ergebnisse

Durch systematische Untersuchungen zum Lösungsverhalten der angegebenen Bewegungsgleichungen (2) bis (8) konnten einige grundsätzliche Ergebnisse zur Hydrodynamik gesteuerter Körper bei Bewegungen in Flüssigkeiten erzielt werden.

Die Darstellung der hydrodynamischen Trägheitskräfte durch Hydrodynamische Massen für reibungsfreie Flüssigkeiten ist für Bewegungen von Schiffen mit beliebiger Form und bei beliebigen Manövern sowohl in unbegrenzten wie auch in begrenzten Gewässern erlaubt. Bei Schiffen und ihren Modellen kann trotz des zum Teil deutlichen Reynoldszahleinflusses auf die äußeren hydrodynamischen Kräfte und Momente dieselbe Struktur der Bewegungsgleichungen verwendet werden, solange die Gierstabilität nicht in einem kritischen, grenzstabilen Bereich liegt. Die Eignung der vereinfachten Gleichungen (5) bis (8) für Aufgaben der Parameteridentifizierung bei gesteuerten Bewegungen der Objekte in der Nähe der geraden Bahn konnte nachgewiesen werden. Von Interesse ist, daß die Struktur der angeführten Gleichungen auch für eine größere Klasse von Unterwasserfahrzeugen gilt [10]. Die Voraussetzung, daß die hydrodynamischen Kräfte infolge Zähigkeit und Wirbeln quasistationär auftreten, d. h. nur von den Momentanwerten des Gierwinkels, der Bahnkrümmung usw. abhängig sind, führt bei Manövern mit schnellen zeitlichen Änderungen dieser Größen zu erkennbaren systematischen Fehlern bei der Voraussage von Bewegungen. Das hat in Rostock bereits Forschungen zu instationären Körperumströmungen mit dynamischem Auftrieb ausgelöst.

Die Anwendung der verschiedenen Identifizierungsverfahren erfolgte in der ersten Phase der Untersuchungen bei ungestörten Systemen. Dazu wurden Bewegungsrechnungen nach Kraftmessungen an Modellen durchgeführt, deren Ergebnisse dann die Grundlage für die Parameteridentifizierung waren.

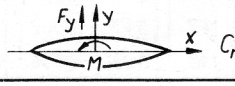
Es zeigte sich, daß die Ergebnisse der angeführten Verfahren, soweit sie untereinander vergleichbar sind, sich nicht nennenswert unterscheiden und daß sie sehr genau sind. Für die Hydrodynamik bedeutungsvoll ist die Tatsache, daß selbst die Kraft- und Momentenanstiege infolge Gierwinkel und Bahnkrümmung mit hoher Genauigkeit ermittelt werden können, Tabelle 2.

Sehr sorgfältig erfolgten Untersuchungen zum Gültigkeitsbereich der linearisierten Bewegungsgleichungen. Offenkundig wurde, daß bei praktischen Anwendungen wegen bisher fehlender Kenntnisse sehr oft ihr Gültigkeitsbereich überschritten ist. Bild 3 zeigt Bahnverläufe für eine Schiffsbewegung, die nach einem einmaligen Ruderlegen von der geraden Bahn aus einsetzt. Werden in den Bewegungsgleichungen die für die gerade Bahn ermittelten Koeffizienten verwendet, dann sind bereits bei einem Ruderwinkel von nur 5° Differenzen zu den tatsächlichen Bewegungen erkennbar, bei 10° sind die Unterschiede nach kurzer Fahrtstrecke beträchtlich.

Die Änderung der Ordnung in den Differentialgleichungen bringt bei diesen Bewegungen keine Verbesserungen. Weitere Untersuchungen belegten, daß es für eine Erweiterung des Gültigkeitsbereiches der linearisierten Gleichungen zweckmäßig ist, mit variablen Koeffizienten in Abhängigkeit vom Bewegungszustand zu arbeiten. Die physikalische Begründung wird vor allem durch die nichtlineare Abhängigkeit der hydrodynamischen Kräfte am Rumpf vom Gierwinkel und der Bahnkrümmung gegeben.

Eine Anwendung verschiedener Identifizierungsmethoden auf gering gestörte Systeme erfolgte bei Versuchen mit freifahrenden gesteuerten Schiffsmodellen. Die Störungen entstehen vor allem durch geringe Ungenauigkeiten in der Antriebs- und Ruderanlage sowie infolge der hydrodynamischen Wechselwirkung der Modelle mit den seitlichen Wänden des Schleppkanals. Das Ziel der Untersuchungen bestand in der schnellen Bestimmung der Koeffizienten in den Differentialgleichungen (5) und der danach möglichen Berechnung der Gierstabilität sowie der Kraft- und Momentenanstiege in Abhängigkeit vom

Tabelle 2
Kraft- und Momentenanstiege infolge Gierwinkel β und Bahnkrümmung $\Omega = L/R$ nach Kraftmessungen (Index M) und nach der Systemidentifizierung (Index S)

Schiffstyp	C_y^β		C_y^Ω		C_m^β		C_m^Ω	
	S	M	S	M	S	M	S	M
301	0,366	0,375	0,102	0,096	0,081	0,081	0,052	0,052
271	0,306	0,296	0,061	0,067	0,075	0,076	0,049	0,050
IX	0,335	0,334	0,072	0,068	0,087	0,092	0,051	0,051
$C_y = C_y^\beta \cdot \beta + C_y^\Omega \cdot \Omega$							$C_m = C_m^\beta \cdot \beta - C_m^\Omega \cdot \Omega$	

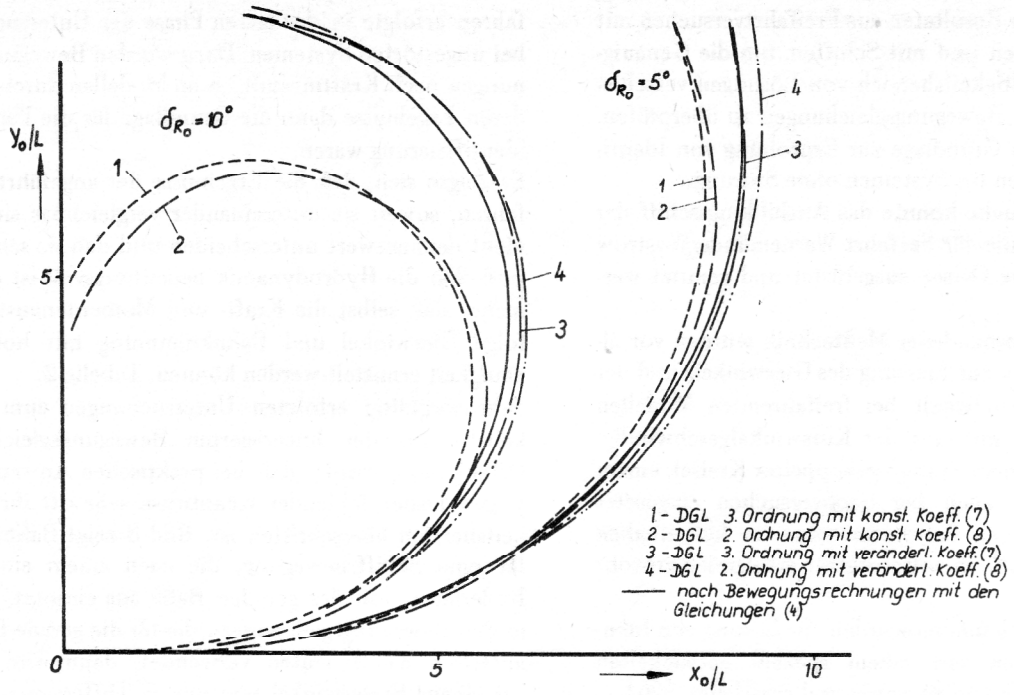
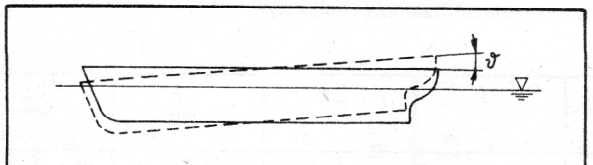


Bild 3
Bahn eines Schiffes bei Fahrt mit konstantem Ruderwinkel in einen Drehkreis

Tiefgang und vom Trimmwinkel des Modells bei verschiedener Beladung und in Abhängigkeit von der Wassertiefe. Die Ermittlung der gesuchten Größen nach Kraftmessungen in einem Rundlaufkanal nimmt soviel Zeit in Anspruch, daß sie bisher unterbleiben mußten.
Als dafür am besten geeignete Identifizierungsmethode erwies sich die Korrelationsmethode nach [27]. Ausgewählte Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Die angeführten Größen sind in Abhängigkeit vom Trimmwinkel angegeben. Bereits kleine Änderungen des Trimmwinkels lassen deutliche Auswirkungen erkennen. Nach qualitativen Überlegungen zur Hydrodynamik von Flügeln mit kleinem Seitenverhältnis ist eine Zunahme der Werte in Richtung der angegebenen Pfeile zu erwarten. Die Ergebnisse der Identifizierung bestätigen diese Tendenz. Insbesondere ergibt eine hecklastige Vertrimmung eine deutlich zunehmende Gierstabilität. Dieses Ergebnis ist für verschiedene Anwendungen von erheblicher Bedeutung. Deutlich wird auch, daß die Bewertung von Einzelmessungen noch nicht immer zu schlüssigen Resultaten führt. Als entscheidende Maßnahme zur Verbesserung der Ergebnisse wird der Einsatz von genaueren Meßmethoden zur Zeit vorbereitet. Für Modellversuche wird der Einsatz einer CCD-Matrix-Kamera zur digitalen Bilderkennung in Verbindung mit einem Rechner zur digitalen Bildverarbeitung erprobt.
Zur Analyse der stark gestörten Meßdaten von Großversuchen bei Vorhandensein von Wind und Wellen wurden zur Vorbereitung der Automatisierung in der Schiffsführung zeitdiskrete Modelle zweiter und dritter Ordnung zur Parameterschätzung verwendet. Für die Anwendung steht komfortable Software zur Verfügung [27], [28].

Tabelle 3
Durch Parameteridentifizierung bestimmte Größen für ein freifahrendes Schiffsmodell in Abhängigkeit von Trimmwinkel ϑ



ϑ[°]	p_1	d/b	f/b	c_y^β	c_y^Ω	c_m^β	c_m^Ω
1	-0,52	1,98	0,68	0,051	0,055	0,039	0,029
0	-0,73	1,55	0,48	0,057	0,068	0,047	0,037
-1	-0,87	1,47	0,43	0,062	0,065	0,029	0,031
-2	-1,20	1,16	0,29	0,055	0,132	0,010	0,036

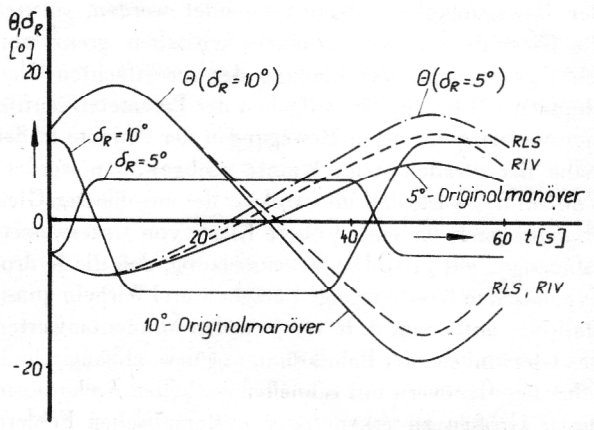


Bild 4
Vergleich originaler und simulierter Manöver eines Schiffes unter Verwendung von Parametern nach verschiedenen Identifikationsmethoden

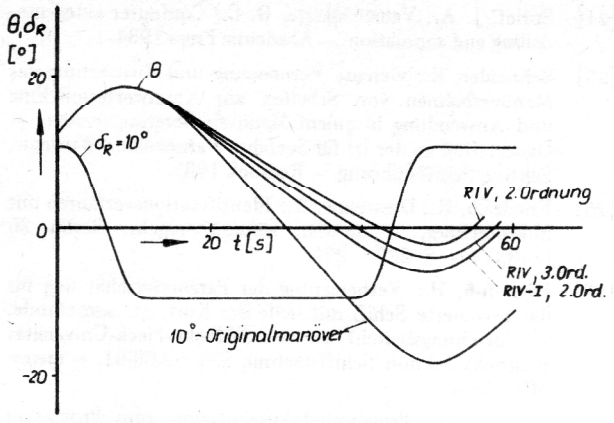


Bild 5
Vergleich originaler und simulierter Manöver eines Schiffes unter Verwendung von Parametern unterschiedlicher mathematischer Modelle (7) und (8) und verschiedener Identifikationsmethoden.

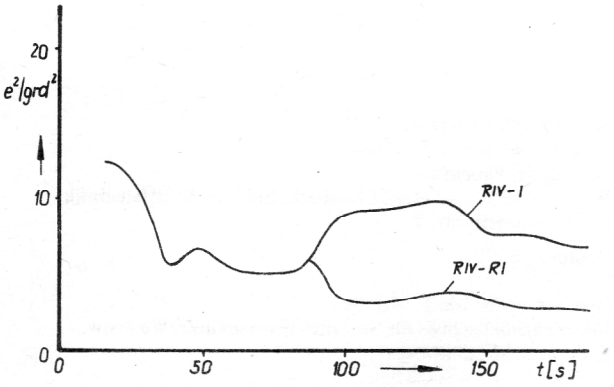


Bild 6
Vergleich der mittleren quadratischen Abweichungen der Simulationsrechnungen für die Methoden RIV-I und RIV-RI

Bei stark gestörten Meßdaten ergab die Rekursive Schätzmethode der Instrumentellen Variablen (RIV), die unabhängig von einer Störfilterannahme arbeitet, bessere Schätzergebnisse als die Rekursive Methode der kleinsten Fehlerquadrate (RLS). Einen weiteren Gewinn brachte die Modifikation der Methode der Instrumentellen Variablen für Systeme ohne Ausgleich (RIV-I) bei der Verwendung von Differentialgleichungen zweiter Ordnung. Für z-Manöver sind in den Bildern 4 und 5 aus identifizierten Parametern berechnete Kursverläufe und tatsächlich gemessene dargestellt. Die Reduzierung der Modellordnung und damit der Anzahl der Parameter wirkt sich positiv auf die Qualität der geschätzten Parameter aus.
Die Anwendung einer Störfilterung (R) auf die Methoden der Instrumentellen Variablen (RIV–R, RIV–RI) führt zu einer wesentlichen Verbesserung des geschätzten Modells, wie aus Bild 6 ersichtlich ist.

6. Zusammenfassung

Es wurden Bewegungsgleichungen für gesteuerte freifahrende Objekte der Meerestechnik mit Anwendung auf Schiffe abgeleitet. Die Hydrodynamik liefert Aussagen zur Struktur der Gleichungen, und sie läßt qualitative Aussagen über die Abhängigkeit der hydrodynamischen Kräfte von den wichtigsten geometrischen und kinematischen Größen sowie den Eigenschaften der Flüssigkeit zu. Zur schnellen quantitativen Bestimmung der Koeffizienten in linearisierten Bewegungsgleichungen werden Methoden der experimentellen Parameteridentifizierung zur Anwendung auf freifahrende Objekte entwickelt und bei Experimenten mit Schiffen und Schiffsmodellen erprobt. Dabei werden entsprechend verschiedenartiger Zielstellungen sowohl kontinuierliche wie auch zeitdiskrete mathematische Modelle zur Lösung von Identifizierungs- und Simulationsaufgaben verwendet.
Für die Hydrodynamik bedeutungsvoll ist, daß nach der Parameteridentifizierung in linearisierten Bewegungsgleichungen auch die Ermittlung der Bewegungsstabilität und der Kraft- und Momentenanstiege infolge Anstellwinkel und Bahnkrümmung bei Modellversuchen schnell möglich ist.
Bei stark gestörten Systemen, wie bei Schiffen unter dem Einfluß von Wind und durch Wind erzeugter Wellen, gelingt die Ermittlung der Parameter in zeitdiskreten Systemen, wie sie zur Lösung von Automatisierungsaufgaben bei gesteuerten Bewegungen benötigt werden.

LITERATUR

[1] Puls, D.: Wissenschaftsstrategie Schiffshydrodynamik. – Forschungsbericht im Auftrag des Rektors der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Nov. 1987. – 92 S., unveröffentlicht.

[2] Korotkin, A. I.: Hydrodynamische Massen eines Schiffes (in russisch). – Verlag Sudostroenie, Leningrad 1986.

[3] Kleinau, D.: Dynamische Gierstabilität und Steuerbarheit von Frachtschiffen bei beschränkter Wassertiefe. – Dissertation B an der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock. – Rostock, 1986.

[4] Jahrbuch der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt 1984. – Bd. I, II; Bonn, 1986.

[5] Martin, H.; Puls, D.: Vertical forces, trimmoments and changes of draught and trim of ships in shallow water. – Schiffbauforschung, 25. Jg. (1986), H. 3 – S. 155 – 159.

[6] Hirano, M. u. a.: A Computer program system for ship maneouvering motion prediction. – Technical Bulletin, Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Japan, Sept. 1985. – p. 1 – 15.

[7] Yang Bao-an: Ein Beitrag zur Beurteilung der Stabilität schneller Schiffe bei gekoppelten Gier-, Quer- und Rollbewegungen. – Schiffstechnik, Bd. 31, H. 1, März 1984. – S. 22 – 42.

[8] Clarke, D. u. a.: The application of maneouvering criteria in hull design using linear theory. – Transactions of the Royal Society of Naval Architects, Bd. 125, 1983. – p. 45.

[9] Oltmann, P.; Sharma, S. D.: simulation of combined engine and rudder manoeuvers using an improved model of hull – propeller – rudder interactions. – 15. Symposium on Naval Hydrodynamics, Hamburg 1984, Late Papers. – p. 1 – 23.

[10] Piegat, A.: Bewegungsverhalten und automatische Kurssteuerung von unbemannten Unterwasserfahrzeugen mit offener Rahmenkonstruktion. – Dissertation B an der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock. – Rostock 1988.

[11] Aström, Vr. J.; Eykhoff, P.: Systemidentification – a survey. – Automatica 7 (1971), p. 123 – 162.

[12] Isermann, R.: Prozeßidentifikation. – Berlin (West), Heidelberg, New York. – Springer Verlag 1974.

[13] Unbehauen, H.; Göhring, B.; Bauer, B.: Parameterschätzverfahren zur Systemidentifikation. – München, Wien. – R. Oldenbourg Verlag 1974.

[14] Landau, I. D.: Adaptive control – the model reference approach. – New York and Basel. – Marcel Deccer Inc., 1979.

[15] Strobel, H.: Experimentelle Systemanalyse. – Berlin. – Akademie-Verlag 1975.

[16] Papenfuß, H.: Kennwertermittlung für die gesteuerte Bewegung eines Schiffsmodells. – Schiffbauforschung 24 (1985) 2. – S. 63 – 69.

[17] Oltmann, P.: Bestimmung der Manövriereigenschaften von Schiffen aus aufgemessenen Bahnkurven. – Schiff und Hafen 30 (1978) H. 7. – S. 630 – 640.

[18] Zilman, G. I.: Identification of hydrodynamic coefficients of manoeuvring equations after ship trial results. – Proceedings, Vol. 1, 5 Nat. Congress on theoretical and applied mechanics. – Varna (VR Bulgarien), 23. – 29. 9. 1985. – p. 13-1 to 13-3.

[19] Zilman, G. I.; Ter-Zakhariants, A.: Parameter identification of ship steering dynamics as a problem of multiobjective optimization. – Vortrag 16. Int. Tagung der IH für Seefahrt Warnemünde/Wustrow 1986. – Veröff. in Wiss. Mitt. IH für Seefahrt 1988 vorgesehen.

[20] Källström, C. G.: Identifikation and adaptive control applied to ship steering. – Diss., Lund Institut of Technology 1979.

[21] Zou Zaojian, Wu Xiuheng: Parameter identification of non-linear KT-equations. – Proc., Vol. 1, 5 Nat. Congress on theoretical and applied mechanics. – Varna, 23. – 29. 9. 85. – p. 15-1 to 15-3.

[22] Majohr, J.: Mathematisches Modellkonzept für Kurs- und Bahnregelstrecken von Schiffen. – Schiffbauforschung 24 (1985) 2. – S. 75 – 89.

[23] Otte, W.-D.: Ein Beitrag zur Systemidentifikation und adaptiven Festwertkursregelung seegehender Schiffe. – Dissertation an der IH für Seefahrt Warnemünde/Wustrow, Sektion Schiffsführung. – Rostock 1987.

[24] Spriet, J. A.; Vansteenkiste, G. C.: Computer aided modelling and simulation. – Academic Press 1984.

[25] Schneider, K.: Genaue Vermessung und Auswertung der Manöverbahnen von Schiffen zur Kennwertermittlung und Anwendung in einem Manövrierberatungssystem. – Dissertation an der IH für Seefahrt Warnemünde/Wustrow, Sektion Schiffsführung. – Rostock 1987.

[26] Friedrich, R.; Drewelow, W.: Identifikationsverfahren mit Mikrorechner. – messen, steuern, regeln; Berlin 26 (1983) 4. – S. 222 – 226.

[27] Papenfuß, H.: Verbesserung der Parameterschätzung für das gesteuerte Schiff mit Hilfe der Korrelationsmethode. – Forschungsbericht an der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Schiffstechnik SST 02-88-01. – unveröffentlicht.

[28] Otte, W.-D.: Programmdokumentation zum Programm „Identifikation". – IH für Seefahrt Warnemünde/Wustrow, Sektion Schiffsführung, WB Navigation. – Rostock 1988.

[29] Baumann, R.: Einführende Untersuchungen zu Modellgleichungen und zur Systemidentifikation der Längsbewegung von Schiffen. – Ingenieurbeleg; IF für Seefahrt Warnemünde/Wustrow, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, 1988.