

546 | Oktober 1994

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Heinrich Söding

**Bewegungen von Katamaranen im
Seegang**

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Bewegungen von Katamaranen im Seegang

Heinrich Söding, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1994

ISBN: 3-89220-546-9

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 546

Bewegungen von Katamaranen im Seegang

Heinrich Söding

Oktober 1994

1 Einführung

Katamarane, also Doppelrumpfschiffe, finden zur Zeit viel Interesse und nicht selten auch Anwendung für Boote und kleinere Schiffe, die mit hoher Geschwindigkeit auf Gewässern mit mäßigem oder sogar starkem Seegang fahren, z.B. für Fähren, Forschungs-Schiffe, Sportboote, Patrouillen-Boote etc. Abarten des normalen Katamarans sind SWATH (small waterplane area twin hulls: Katamarane mit relativ kleiner Wasserlinienfläche) und SES (surface-effect ships: Katamarane mit einem Luftkissen zwischen den Rümpfen) (Bild 1).

2 Berechnungsmethode

Seit 1982 habe ich Methoden zur Berechnung der Bewegungen und Belastungen von Katamaranen im Seegang entwickelt. Das daraus entstandene Programm-System wurde von der Marinetechnik GmbH SEDOS (See-Verhalten von Doppelrumpf-Schiffen) getauft. Zur Zeit kann es noch keine SES (außer im Betriebszustand ohne Kissendruck) behandeln; dies wird aber in Kürze ergänzt.

Grundlage der SEDOS-Berechnungen in regelmäßigen Wellen ist die lineare 'Streifenmethode'. Sie erfaßt nur solche Seegangs-Wirkungen, die linear mit der Wellenhöhe anwachsen, und ergibt als Lösung harmonische Schiffsbewegungen in 6 Freiheitsgraden infolge von harmonischen Wellen mit gegebener Wellenlänge, Wellenhöhe und Laufrichtung. In erster Linie wichtig für die Größe und Phasenlage der Schiffsbewegungen sind die Kräfte und Momente, die das umgebende Wasser auf das Schiff ausübt. Diese Kräfte lassen sich aufteilen in

- Froude-Kriloff-Kräfte, d.h. Kräfte infolge der Druckverteilung in der (vom Schiff nicht gestört gedachten) Welle
- Diffraktionskräfte, d.h. Kräfte infolge der Änderung der Wellen-Strömung durch das (unbewegt gedachte) Schiff
- Radiationskräfte, d.h. Kräfte infolge der Schiffsbewegungen

Die Froude-Kriloff-Kräfte lassen sich einfach aus dem bekannten Druck in der Welle berechnen: der Wellendruck wird mit dem Normalen-Vektor auf der Außenhaut des Schiffes multipliziert und über die Außenhaut integriert. Die anderen beiden Kraft-Anteile werden bei der von mir verwendeten Streifenmethode nach einer dem Impulssatz entsprechenden Gleichung berechnet:

$$f = D[-aDu + eD\zeta] \quad (1)$$

Dabei bezeichnet f die komplexe Amplitude der Kraft pro Meter Schiffslänge; f ist ein Spaltenvektor, dessen drei Komponenten die Horizontalkraft, die Vertikalkraft und das Krängungsmoment pro Längeneinheit angeben. Entsprechend ist u ein 3-Komponenten-Spaltenvektor, der die komplexe Amplitude der Spantverschiebung (seitlich, nach unten bzw. drehend) angibt. D entspricht einem Differentialoperator, der die zeitliche Änderung für einen Punkt angibt, der sich wie ein Wasserteilchen mit der Schiffsgeschwindigkeit U nach hinten bewegt:

$$D = i\omega_e - U\partial/\partial x \quad (2)$$

Da wir statt mit den harmonisch über der Zeit schwankenden Größen mit den komplexen Amplituden dieser Größen rechnen, tritt in D an die Stelle der Zeitableitung die Multiplikation mit $i\omega_e$. a ist die komplexe hydrodynamische Masse, d.h. das Verhältnis zwischen den komplexen Amplituden der Spantkräfte einerseits und der Spantbeschleunigung andererseits. Da die Kräfte und die Bewegungen je drei Komponenten haben, ist a eine 3×3 -Matrix. a wird durch

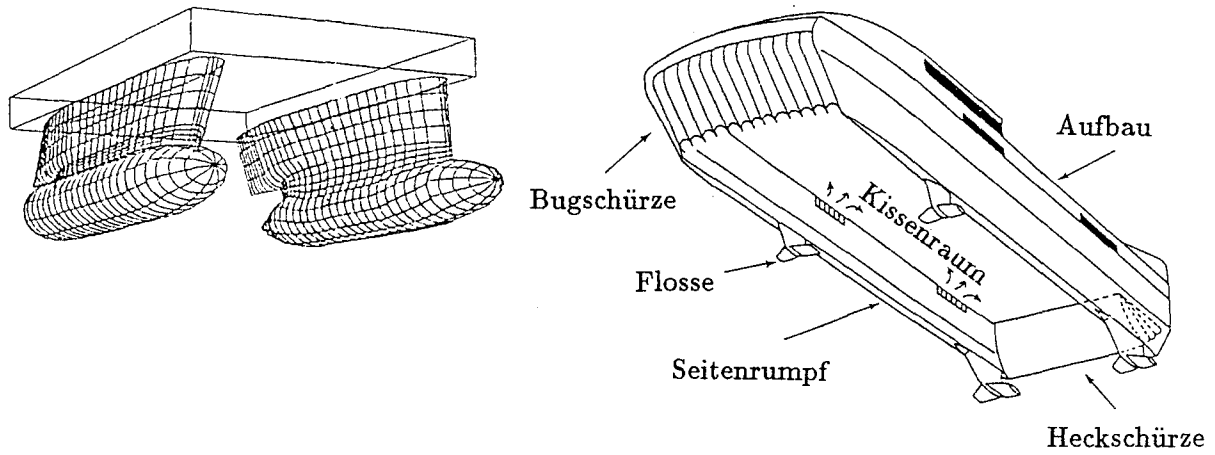
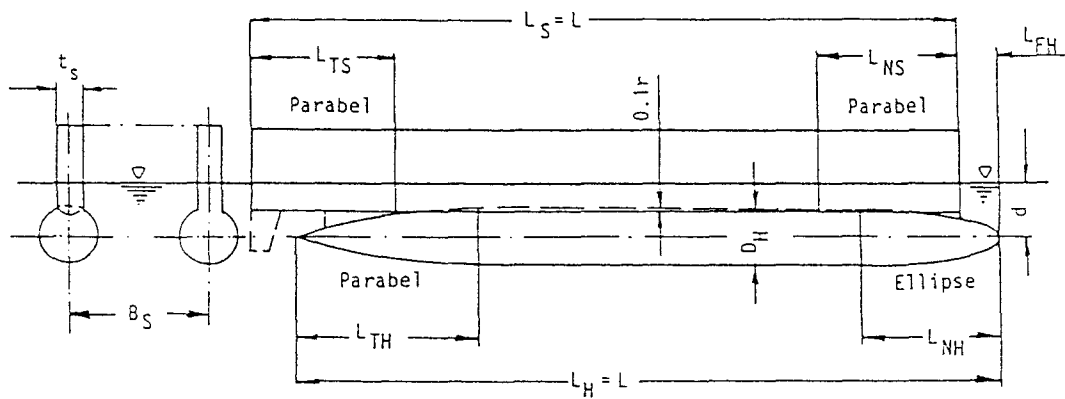


Bild 1. Swath (links) und SES (rechts)



$$\begin{array}{llll}
 L_H = 2,500\text{m} & L_S = 2,500\text{m} & L_{TS} = 0,625\text{m} & L_{NS} = 0,625\text{m} \\
 L_{TH} = 0,800\text{m} & L_{NH} = 0,625\text{m} & D_H = 0,160\text{m} & B_S = 0,800\text{m} \\
 t_S = 0,080\text{m} & d = 0,160\text{m} & L_{FH} = 0,150\text{m} &
 \end{array}$$

Bild 2. Swath-Modell aus Blume und Söding (1993)

eine zweidimensionale Berechnung der reibungsfreien Umströmung des Spants abhängig von der Frequenz der Spantbewegung unter Beachtung des Einflusses der freien Wasseroberfläche berechnet. In SEDOS wird dazu eine Rankine-Quell-Methode benutzt. Der erste Term in (1) gibt damit die von der Spantbewegung verursachten Radiationskräfte an; der Term läßt sich als Zeitableitung des hydrodynamischen Impulses des den Spant umgebenden Wassers ansehen, wobei der Impuls die hydrodynamische Masse multipliziert mit der Geschwindigkeit, also der Zeitableitung der Verschiebung des Spants, ist. Entsprechend bezeichnet der zweite Term die Diffraktionskraft. Dabei bedeutet ζ die (skalare) komplexe Amplitude der Welle an dem Spant, und e ist das Verhältnis zwischen den komplexen Amplituden der 3 Komponenten der Diffraktionskraft auf den Spant zur Wellenhöhe an dem Spant. e wird wie a aus einer 2-dimensionalen Potential-Berechnung nach einer Rankine-Quell-Methode berechnet.

Die Kräfte ergeben sich bei dieser Streifenmethode also aus dem Impulssatz, ohne daß das stationäre Strömungsfeld um das fahrende Schiff berücksichtigt wird. Tatsächlich hat die stationäre Ausweich-Bewegung des Wassers um das fahrende Schiff herum jedoch Einfluß auf die oszillierenden Kräfte im Seegang, u.a. weil die Wellen im Einflußbereich der Schiffsumströmung gestört werden und weil das quadratische Glied in der Bernoulli-Gleichung zu Druck-Anteilen führt, die proportional zum Produkt der stationären Ausweich-Geschwindigkeit mit der periodischen Geschwindigkeit sind. Deshalb wird vielfach behauptet, daß die Streifen-Methode nur bei kleinen Schiffsgeschwindigkeiten ausreichend genau sei, weil nur bei geringer Fahrt des Schiffes die stationäre Ausweichbewegung des Wassers um das Schiff entsprechend langsam ist. Dagegen haben Versuche von *Keuning (1990)* gezeigt, daß die Streifenmethode zumindest bis zu Froude-Zahlen $F_n = 0,6$, vermutlich auch bis $F_n = 1,1$, gute Ergebnisse liefert, wenn man sorgfältig vorgeht und insbesondere die stationäre Wellenbildung sowie die Schwimmelage-Änderung infolge der Fahrt des Schiffes beachtet, um die Eintauchtiefe der Schiffsquerschnitte zu bestimmen.

Ich bin sogar der Meinung, daß die sachgerecht angewendete Streifenmethode bei schnellen Schiffen meist genauer als bei langsamen ist. Denn die von der Fahrgeschwindigkeit abhängigen Fehler einer solchen Streifenmethode scheinen nur mit der stationären Ausweich-Bewegung des Wassers um das Schiff zusammenhängen, nicht mit der gleichmäßigen Längs-Strömung infolge der Fahrt des Schiffes. Die Ausweich-Strömung, hauptsächlich in Quer- und Tiefenrichtung, ist aber relativ zur Längsströmung bei schnellen Schiffen klein, weil schnelle Schiffe in aller Regel schlanker gebaut oder flacher eingetaucht sind als langsame Schiffe.

Neben dieser Grundgleichung zur Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte werden in SEDOS viele Details beachtet, die für die Genauigkeit der Ergebnisse oder die Breite der Anwendungen wichtig sind:

- Die Wechselwirkung zwischen beiden Rümpfen eines Katamarans wird erfaßt, indem von einem Rumpf ausgehende Radiationswellen (durch die Rumpfbewegungen) am anderen Rumpf bei der Berechnung der Rumpfkkräfte berücksichtigt werden. Ebenso werden die Diffraktionswellen (Reflektion der einfallenden Wellen an einem Rumpf und Abschwächung der einfallenden Wellen beim Unterqueren des Rumpfes) am anderen Rumpf berücksichtigt. Dabei wird beachtet, daß die Wellen Zeit benötigen, um von einem Rumpf zum anderen zu gelangen, und daß das Schiff während dieser Zeit vorausfährt. Dies führt dazu, daß die Wechselwirkung bei größeren Schiffsgeschwindigkeiten keine Rolle mehr spielt.
- Längskräfte werden durch Ansatz einer hydrodynamischen Masse für Längsbeschleunigung und der Froude-Kriloff-Kräfte infolge der vom Schiff nicht gestörten Druckverteilung in der erregenden Welle angenähert.
- Bei hydrostatischen und hydrodynamischen Termen wird berücksichtigt, daß ein unter die Wasserlinie reichender Spiegel bei höheren Geschwindigkeiten nicht benetzt ist.

- Besondere Vorkehrungen sind für die Fälle extrem kleiner und negativer Begegnungsfrequenz erforderlich.
- Feststehende und in einfacher Weise gesteuerte Ruder und andere Flügel können berücksichtigt werden. An ihnen werden Massen-, Dämpfungs- und Wellen-Erregerkräfte wirksam.
- Durch Ablösung der Strömung von schräg angeströmten Rumpfqerschnitten entstehen nach der Potentialtheorie nicht erfaßbare Widerstandskräfte, die quadratisch von der Quergeschwindigkeit abhängen. Diese werden durch Ansatz von Widerstandsbeiwerten abgeschätzt und nach der Methode der äquivalenten Linearisierung berücksichtigt.
- Die Relativbewegungen zwischen Schiff und Wasseroberfläche können berechnet werden; dies ermöglicht es, abzuschätzen, bis zu welchen Seegängen die angenommene Linearisierung zulässig ist.
- Zur Festigkeits-Bemessung der Schiffs-Struktur können die Schnittkräfte und -momente in gedachten Schnitten durch die Schiffsrümpfe und durch die verbindende Brücken-Konstruktion berechnet werden.
- Zusatzprogramme erlauben die Berechnung von kennzeichnenden Amplituden der Schiffsreaktionen in natürlichem, unregelmäßigem Seegang, sowohl gemeinsam für alle Frequenzbereiche als auch aufgeteilt in Frequenzbänder (z.B. Terz- oder Oktav-Bänder).
- Der Zusatzwiderstand im Seegang kann nach der Methode von Boese abgeschätzt werden.

3 Vergleich mit Meßergebnissen

Von Blume (siehe *Blume und Söding 1994*) wurden an mehreren 2,5 m langen SWATH-Modellen (Bild 2) sorgfältige Messungen der meisten Elemente der Massen- und Dämpfungsmatrix und der erregenden Kräfte und Momente in Wellen durchgeführt und mit den Ergebnissen von SEDOS verglichen. Im Gegensatz zu den in (1) betrachteten Matrizen für die Spantkräfte hat die Massenmatrix für ein ganzes Schiff die Größe 6×6 . Zunächst betrachten wir die Größen, die für die 'symmetrischen' Bewegungen, also die Längs-, Tauch- und Stampfbewegungen, maßgebend sind (Bild 3-5). Die erregenden Kräfte F_x , F_z (in Längs- bzw. vertikaler Richtung) und M_y (das Stampfmoment) in Wellen schräg von vorn zeigen nur geringe Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit und gute Übereinstimmung zwischen Messung (fette Symbole) und Berechnung (dünne Symbole und Linien). Die angegebenen Geschwindigkeiten des Modells von 2 und 3 m/s entsprechen Froudezahlen von 0.4 bzw. 0.6. Auch die hydrodynamische Masse bzw. das hydrodynamische Trägheitsmoment für Tauch- und Stampfbewegung und die Kopplungsterme M_{35} (Kraft in Richtung 3 (vertikal) infolge Beschleunigung in Richtung 5 (Stampfen) zeigen gute Übereinstimmung. Der Kopplungsterm M_{53} scheint zwar größere Abweichungen zu zeigen; hier muß man aber bedenken, daß dieser Term sehr klein ist. Weiter ist zu beachten, daß die Messungen bei kleinen Frequenzen schwierig sind und daß Fehler der Massenterme bei kleinen Frequenzen die Bewegungen kaum beeinflussen. Ähnlich gut sieht es mit der hydrodynamischen Dämpfung aus – mit Ausnahme der Tauchdämpfung N_{33} bei der Geschwindigkeit 0, wo die Meßwerte verschwindend kleine oder sogar negative Dämpfung anzuzeigen scheinen. Die gute Übereinstimmung bei Fahrt voraus und die Streuungen der Meßwerte lassen in diesem Fall Zweifel an deren Genauigkeit zu.

Kommen wir nun zu den 'antimetrischen' Bewegungen, nämlich Verschiebungen in Quer- richtung und Drehungen um die Längs- und die Hochachse (Roll- und Gierbewegung) (Bild 6-8). Bei den erregenden Kräften und Momenten F_y , M_x und M_z stimmen die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen bei der Fahrgeschwindigkeit 0 gut überein. Die Meßergebnisse ändern sich aber kaum bei Fahrt voraus, während die Rechenergebnisse einen großen Einfluß der Froudezahl zeigen. Auch bei den Massen und Dämpfungen sind viel größere Unterschiede

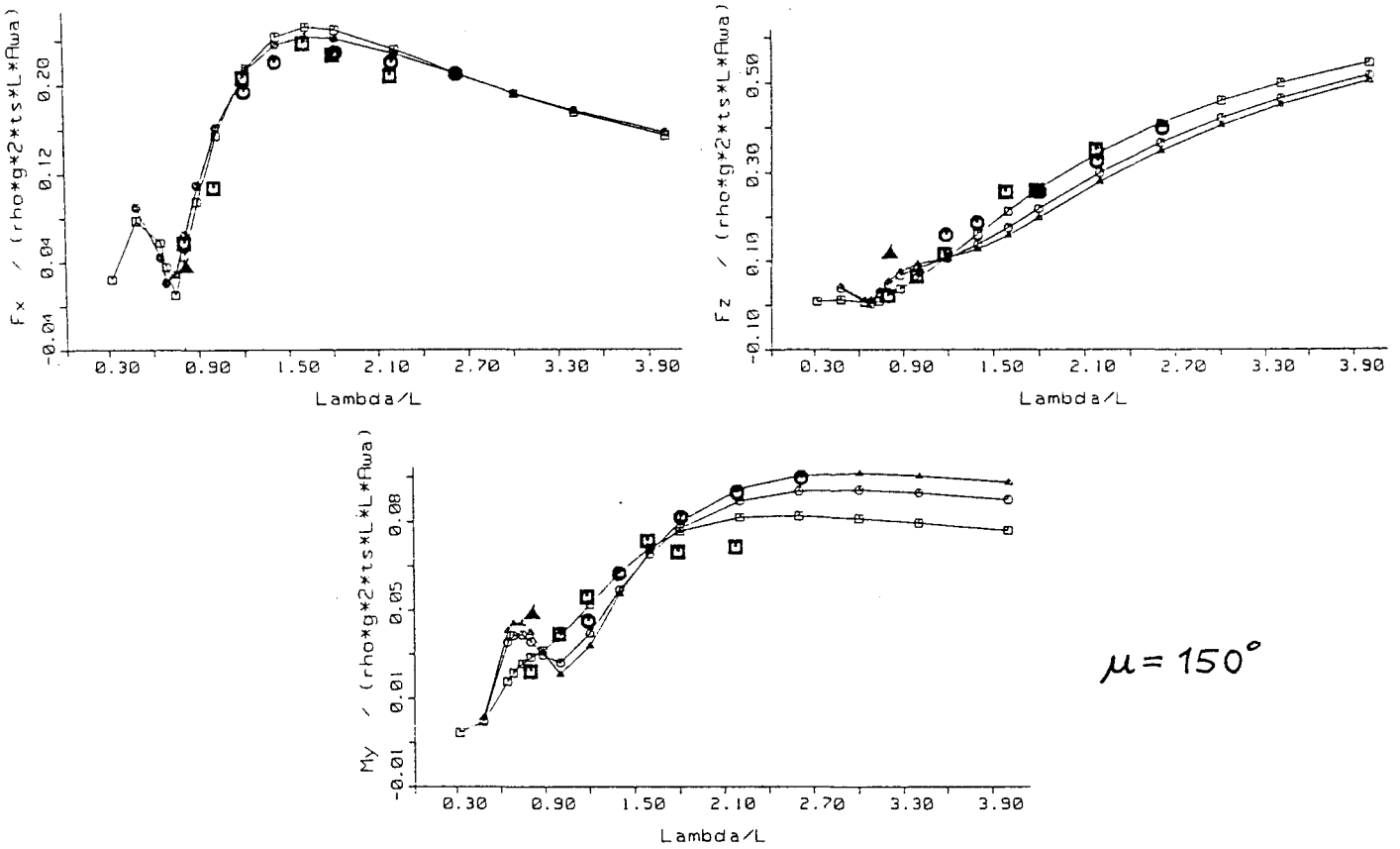


Bild 3. Symmetrische erregende Kräfte in Wellen nach SEDOS-Rechnungen (Kurven) und Messungen von Blume (fette Symbole) für $F_n = 0$ (Quadrat), 0,4 (Kreis) und 0,6 (Dreieck)

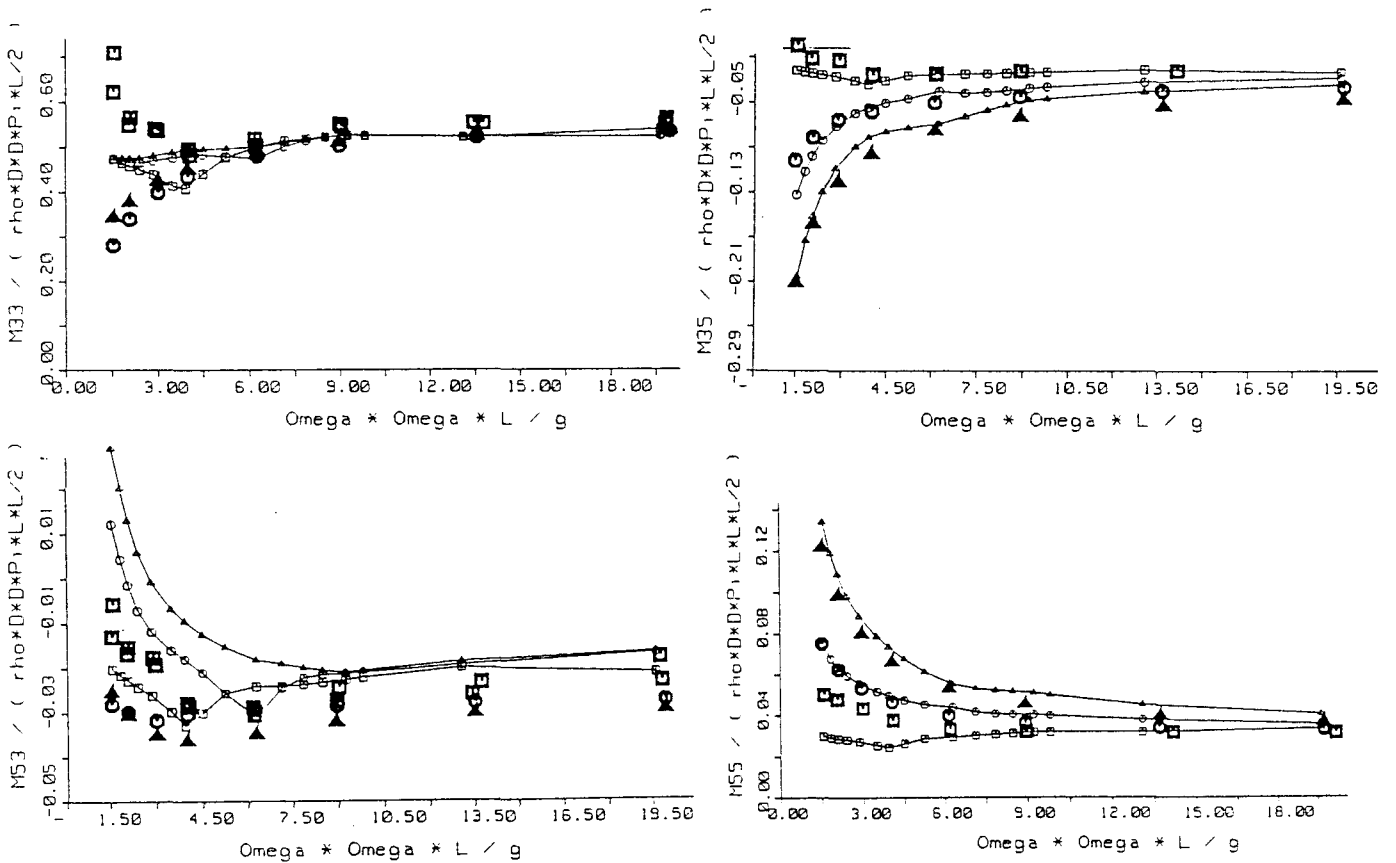


Bild 4. Elemente der Massenmatrix für symmetrische Bewegungen. Symbole wie in Bild 3.

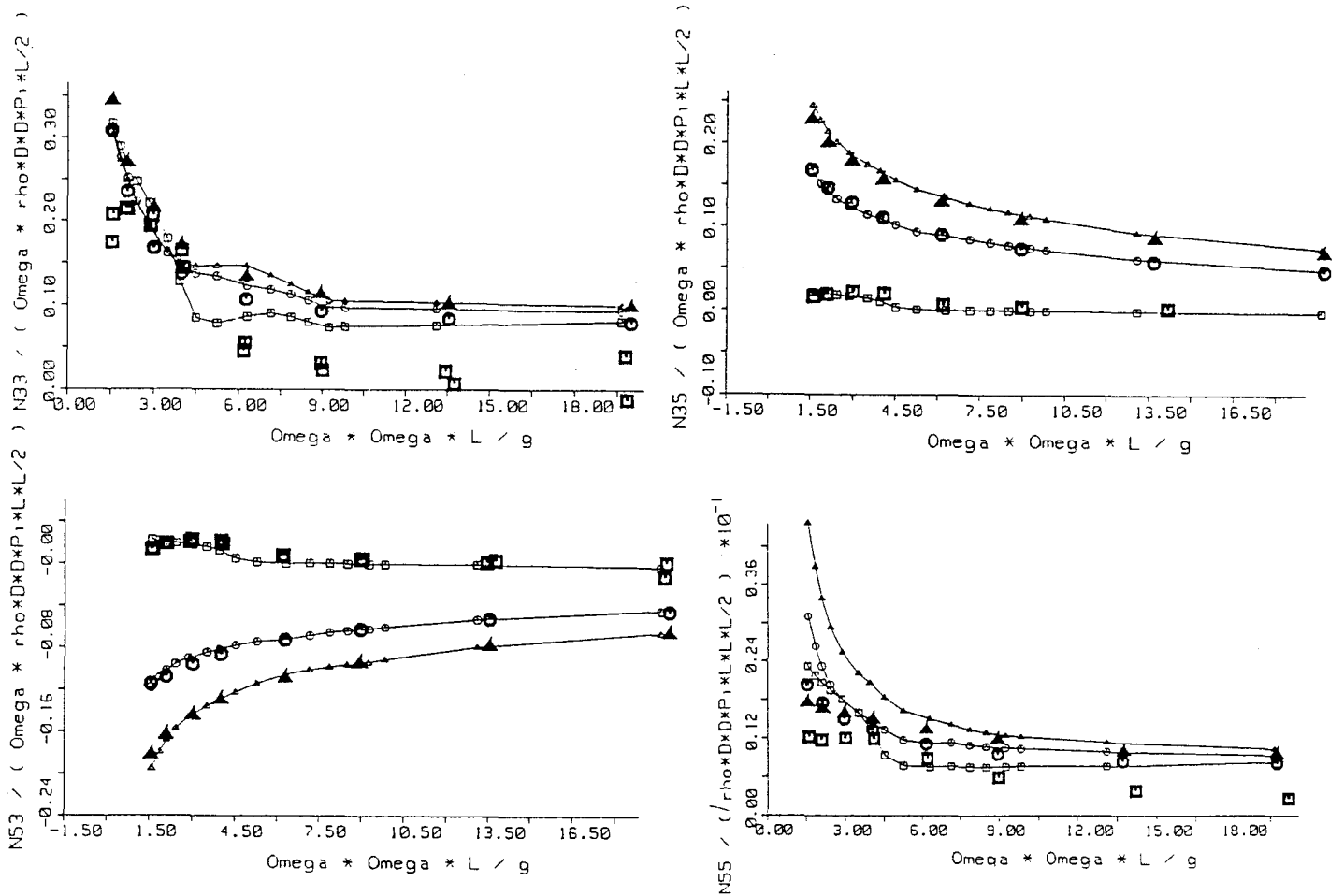


Bild 5. Elemente der Dämpfungsmatrix für symmetr. Bewegungen. Symbole wie in Bild 3.

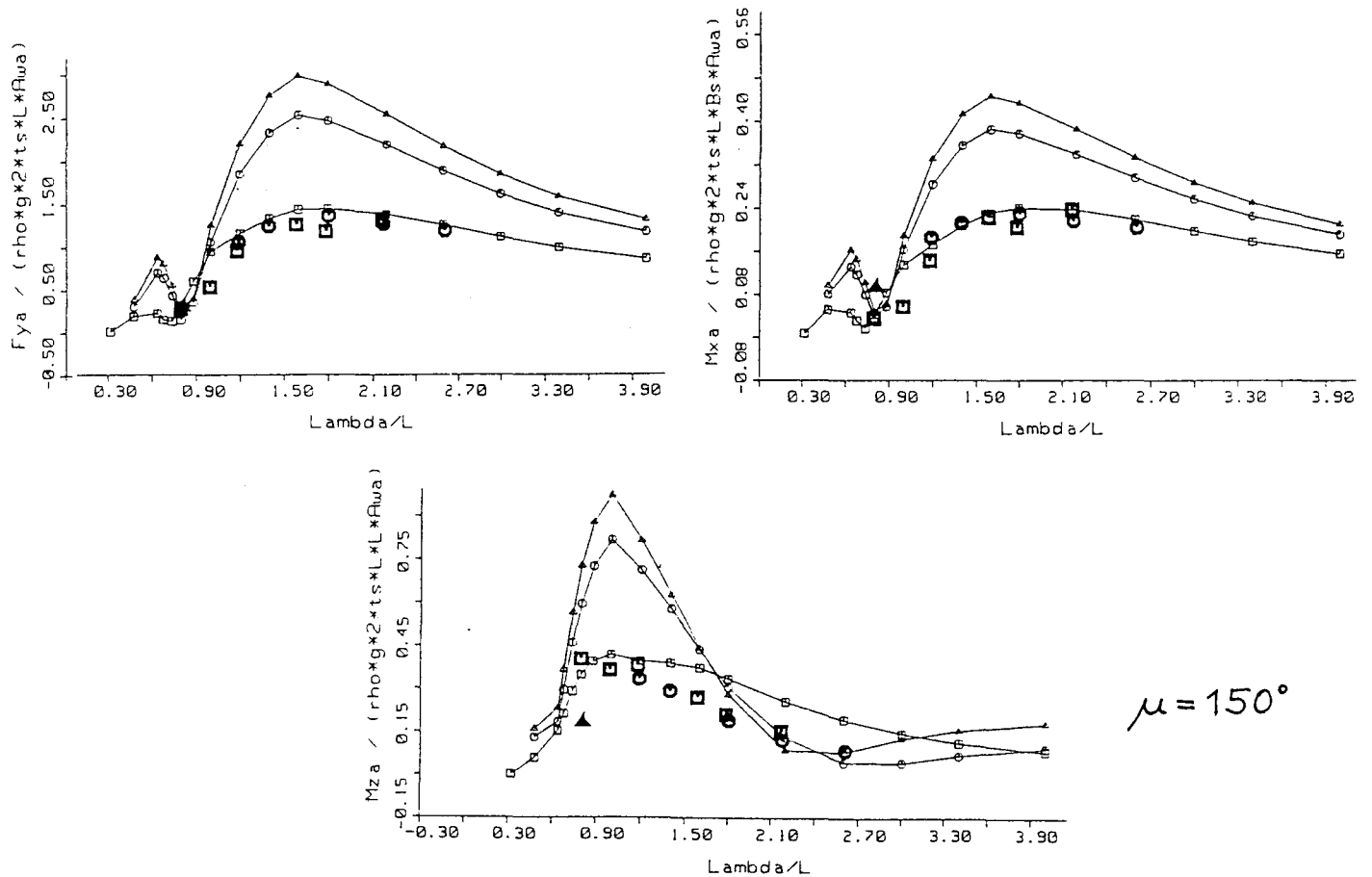


Bild 6. Antimetrische Erregende Kräfte in Wellen nach SEDOS-Rechnungen (Kurven) und Messungen von Blume (fette Symbole) für $F_n = 0$ (Quadrat), 0,4 (Kreis) und 0,6 (Dreieck)

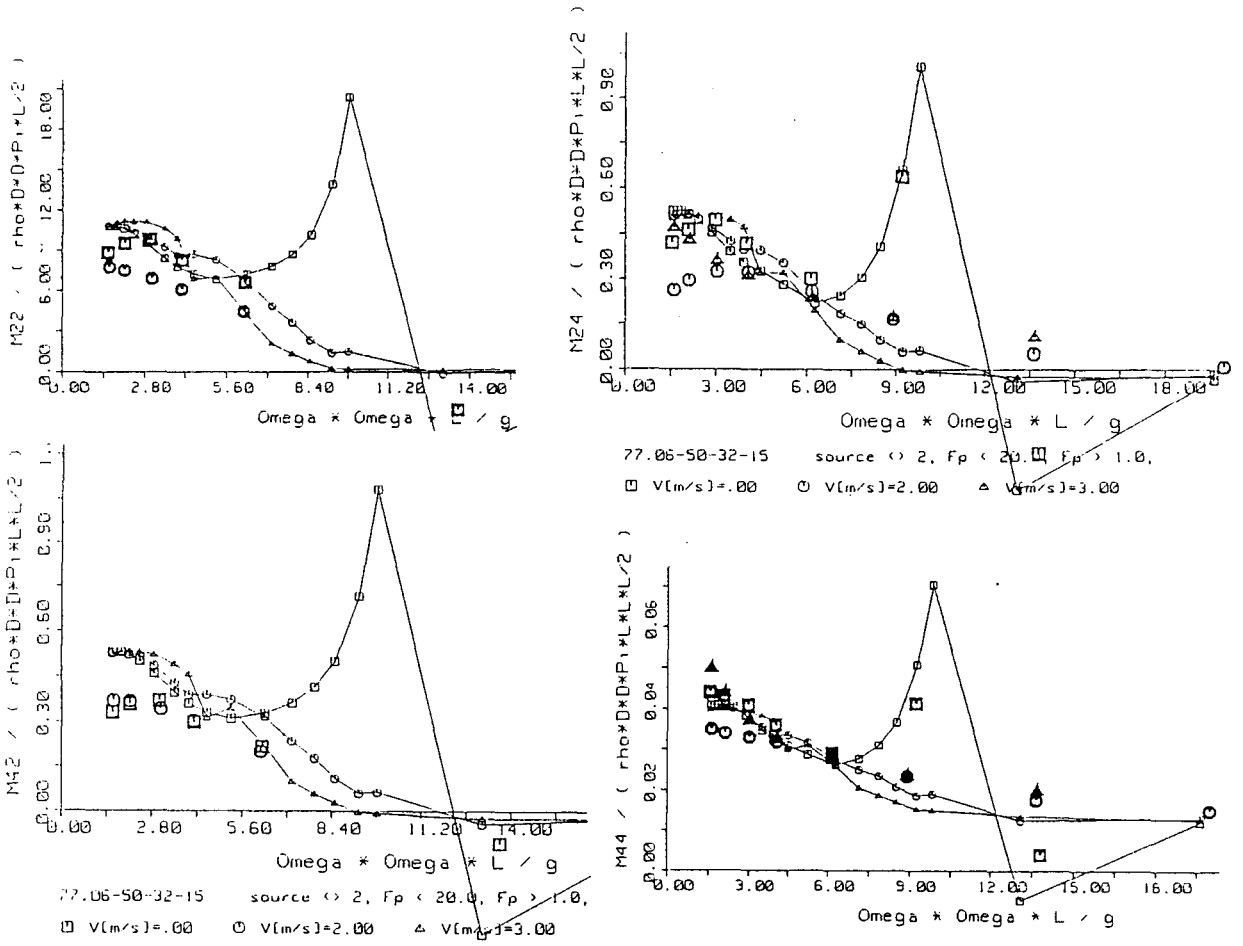


Bild 7. Elemente der Massenmatrix für antimetrische Bewegungen. Symbole wie in Bild 6.

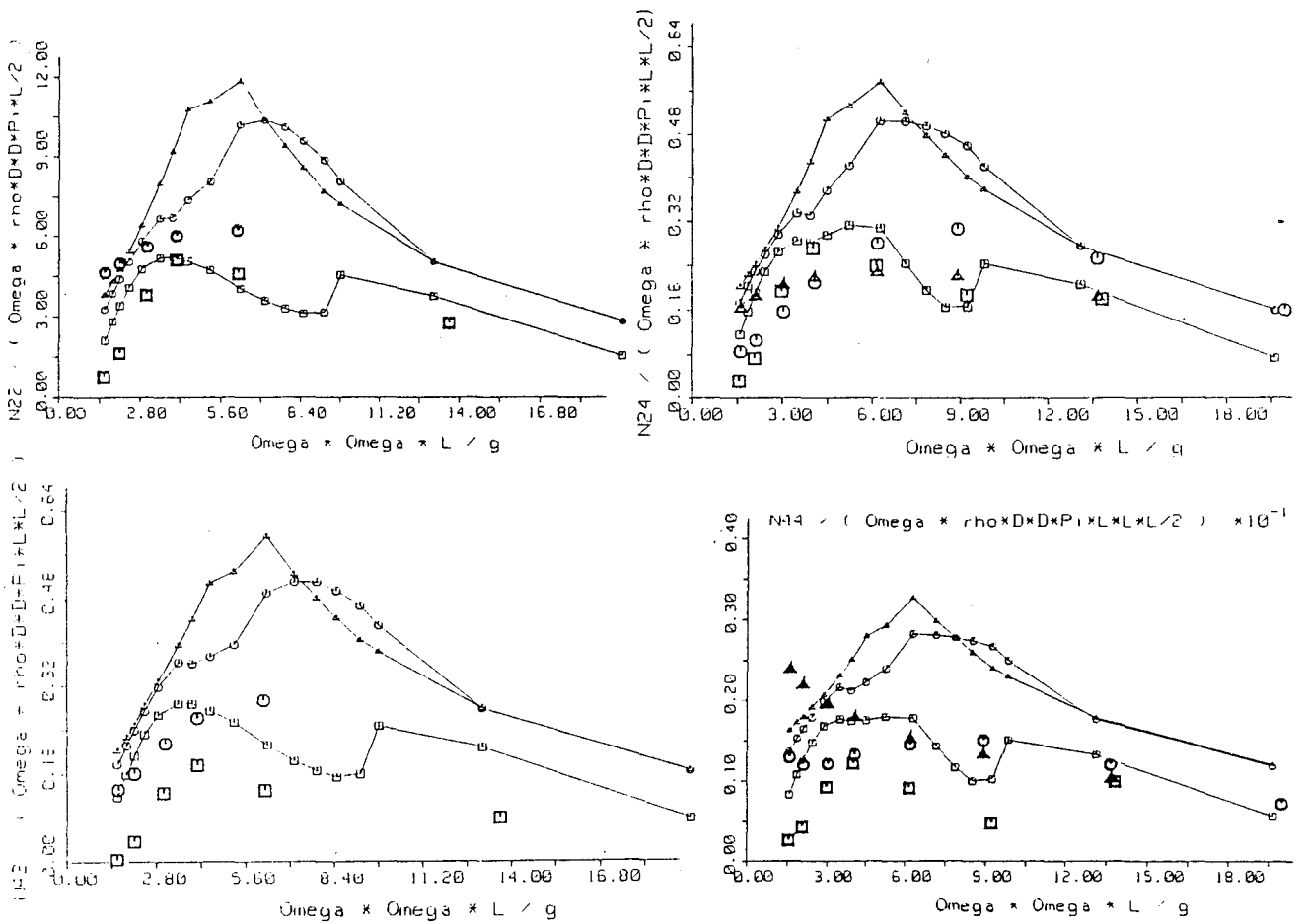


Bild 8. Elemente der Dämpfungsmatrix für antimetr. Bewegungen. Symbole wie in Bild 6.

zwischen Messungen und Berechnungen als bei den vertikalen Bewegungen zu erkennen. Zum Teil könnten diese auf zu hoch angesetzten empirischen Widerstands-Koeffizienten (es wurde 0.7 angesetzt) beruhen.

Es bestand aber auch der Verdacht, daß die für die Streifenmethode typische Vernachlässigung des Strömungsfeldes um das in glattem Wasser fahrende Schiff die Ursache für diese Fehler sein könnte. Deshalb wurde eine von *Hachmann (1991)* publizierte Methode auf dasselbe SWATH angewendet. Bei dieser Methode wird das Strömungspotential um das Schiff im Seegang aus drei Anteilen zusammengesetzt:

$$\phi(\vec{\xi}, t) = -U\xi + \phi^0(\vec{x}) + \phi^1(\vec{\xi}, t) \quad (3)$$

$\vec{\xi}$ ist der Ortsvektor zu einem Punkt in der Flüssigkeit in einem Inertial-System, das die gleichmäßige Fahrt voraus des Schiffes mitmacht, aber nicht die periodischen Bewegungen im Seegang. Dagegen bezeichnet \vec{x} den Ortsvektor in einem mit dem Schiff fest verbundenen Koordinatensystem. Der erste Term auf der rechten Seite ist das Potential infolge der Fahrt voraus ohne Störung durch den Schiffsrumpf (eine Parallelströmung nach hinten); der zweite Term bezeichnet die Störung der Parallelströmung durch das gleichmäßig fahrende Schiff; der letzte Term erfaßt den Einfluß der Wellen und ihrer Störung durch das bewegte Schiff. $\vec{\xi}$ und \vec{x} bezeichnen denselben Punkt, aber ausgedrückt in verschiedenen Koordinatensystemen. An einem im Inertialsystem zeitlich festen Punkt verändern sich der zweite und dritte Term.

Wesentlich an dieser Zerlegung des Potentials ist, daß das Störpotential der Schiffsumströmung in glattem Wasser bei bewegtem Schiff als den Schiffsbewegungen folgend angesetzt wird. Das bedeutet nicht, daß sich die Wasserteilchen mit dem Schiff drehen; vielmehr zeigt das Vorhandensein eines Potentials nach (3), daß die Strömung drehungsfrei ist. Da sich die wellenfreie Wasserlinie relativ zum Schiff infolge der Schiffsbewegungen verschiebt und verdreht, müßte sich eigentlich auch die stationäre Ausweichbewegung des Wassers um das fahrende Schiff verändern. Dies wird vernachlässigt. Der dadurch entstehende Fehler erscheint aber viel kleiner als der Fehler der Streifenmethode, bei der die stationäre Störströmung um das fahrende Schiff überhaupt nicht beachtet wird.

Üblich ist dagegen, wenn man genauer als nach der Streifenmethode rechnen will, eine Zerlegung des Potentials, bei der als zweiter Term das stationäre Störpotential des Schiffes in seiner Mittellage im Inertialsystem angesetzt wird. Die Veränderung dieses Potentials im Inertialsystem durch die Lageänderung des Schiffes wird üblicherweise unter Berücksichtigung der Randbedingung an der Schiffswand und manchmal auch an der freien Oberfläche als Anteil in ϕ^1 erfaßt. Dies führt dazu, daß in den Randbedingungen für ϕ^1 und bei der Berechnung seiner Kraftwirkungen zweite Ableitungen des stationären Potentials ϕ^0 , die sogenannten m -Terme, auftreten, die mit den gebräuchlichen numerischen Verfahren kaum zu bestimmen sind. Bei dem hier benutzten Ansatz nach *Hachmann* treten dagegen keine zweiten Ableitungen von Potentialen auf.

Um den Unterschied zwischen der H-Methode nach *Hachmann* und der von mir normalerweise benutzten Streifenmethode für das untersuchte SWATH zu studieren, wurden alle anderen Details der Berechnung unverändert gelassen und nur die Streifenmethode gegen die H-Methode ausgetauscht (*Söding und Blume 1994*). Die Bilder 9-11 (für $F_n = 0.4$) zeigen das vielleicht enttäuschende Ergebnis: Die Unterschiede zwischen der Streifenmethode und der H-Methode sind für ein schlankes Schiff wie ein SWATH so klein, daß sie gegenüber den Unterschieden zwischen Messungen und Berechnungen keine Rolle spielen. (Die Auftragung ist hier so geändert, daß kleine Frequenzen, also große Wellenlängen jetzt auf den Diagrammen rechts erscheinen. Abweichungen bei großen Wellenlängen sind von geringer Bedeutung und können durch Meßfehler beeinflußt sein.)

Woran können dann die Unterschiede zwischen den gemessenen und gerechneten Koeffizienten liegen? Sie treten nur bei Fahrt voraus für die antimetrischen Wellen- und Schiffsbewe-

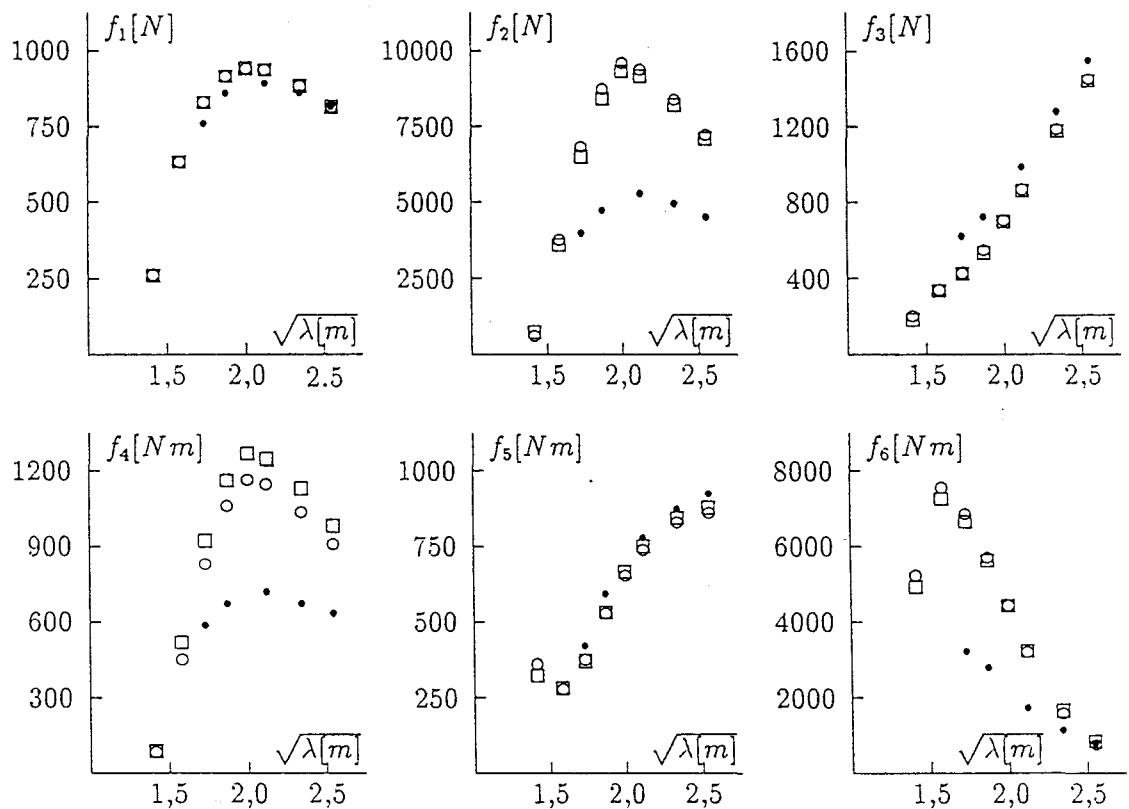
gungen auf und hängen offenbar nicht von der endlichen Schlankheit des Schiffes ab. Meines Erachtens ist die einzige denkbare Ursache ein nicht potentialtheoretisch erklärbarer Effekt: die durch Zähigkeit bedingte Ablösung der Strömung vor allem an der Vorderkante der Stütze bei Schräganströmung. Vielleicht wäre dieser Effekt weniger ausgeprägt, wenn die Wasserlinien der Stütze vorn abgerundet statt spitz wären; solche Versuche sind aber leider nicht gemacht worden, und es ist nicht sicher, daß bei abgerundeter Stütze die Ablösung deutlich anders ausgefallen wäre.

Wie stark wirken sich die Fehler in den erregenden Kräften und Momenten, in den Massen und Dämpfungen auf die Bewegungen aus? Wesentliche Fehler traten nur bei den unsymmetrischen Koeffizienten auf; diese beeinflussen nur die unsymmetrischen Bewegungen: die Verschiebung querschiffs, das Rollen und das Gieren. Über das Gieren können hier keine Aussagen gemacht werden, weil bei den Messungen keine Gierschwingungen untersucht wurden. Die Querbewegungen ergaben sich mit den gemessenen Koeffizienten bei größeren Wellenlängen richtig, weil sich dort die Einflüsse der zu groß berechneten Massen, Dämpfungen und erregenden Kräfte aufheben. Bei kurzen Wellen, bei denen die hydrodynamischen Massen für Querbewegung fast verschwinden, ergaben sich durch die zu groß berechneten Erregerkräfte in Wellen etwa doppelt so große Querbewegungen wie mit den gemessenen Koeffizienten. Glücklicherweise spielen die Querbewegungen praktisch keine große Rolle. Die Rollbewegung ergab sich dagegen auch mit den fehlerhaften Koeffizienten weitgehend (Fehler bis zu etwa 20%) richtig, weil sich zu große erregende Kräfte mit zu großen Massen und Dämpfungen fast aufhoben.

Die bisherigen Vergleiche zwischen Messung und Rechnung bezogen sich auf die Koeffizienten in den Bewegungsgleichungen. Weniger empfindlich, aber direkter interpretierbar sind Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Bewegungen, wie sie von *Schellin und Papanikolaou (1991)* für ein SWATH ohne und mit Flossen publiziert wurden (Bild 12). Bei den Froudezahlen 0,35 und 0,70 ergeben sich gute Übereinstimmungen zwischen den SEDOS-Ergebnissen und Messungen (für $F_n = 0,35$) bzw. SEDOS-Ergebnissen Berechnungen nach einem dreidimensionalen Panel-Verfahren (für $F_n = 0,70$). Die großen Unterschiede zwischen Meß- und Rechenergebnissen bei der Fahrgeschwindigkeit 0 können auf Meßschwierigkeiten beruhen; es ist schwer, bei der Fahrgeschwindigkeit 0 einen Einfluß der Tank-Seitenwände auf die Meßergebnisse zu vermeiden. Nicht ausschließen läßt sich aber, daß die Wechselwirkung zwischen den Rümpfen, die nur bei geringer Fahrgeschwindigkeit wesentlich ist, in meinem Rechenverfahren nicht richtig erfaßt worden ist. Auf eine mögliche Verbesserung bei der Behandlung der Wechselwirkung ist inzwischen von *Hachmann und Söding (1993)* hingewiesen worden. Meines Erachtens zeigen die Bilder, daß der Einfluß von Flossen in SEDOS richtig erfaßt wird und daß eine dreidimensionale Berechnungsmethode für so schlanke Körper wie SWATH nicht erforderlich ist, zumindest nicht bei den hier untersuchten Wellenlängen größer als $1/3$ Schiffslänge.

4 Bewertungsmaßstab für das Seeverhalten von Fähren

Für schnelle Fähren wird man auf Gewässern mit Seegang im Allgemeinen nur dann ausreichend Fahrgäste finden, wenn die Schiffsbewegungen so angenehm sind, daß die Passagiere kaum seekrank werden. In der Ergänzung 2 zur ISO-Norm 2631 werden Grenzen für die Beschleunigung im Frequenzbereich von 0,1 bis 0,63 Hz angegeben, bei deren Überschreitung etwa 10% von an solche Bewegungen nicht gewöhnten jungen Männern nach verschiedenen Expositionszeiten sich 'stark unwohl fühlen' (Bild 13). Die angegebenen Beschleunigungsgrenzen bedeuten die Standard-Abweichung der vertikalen Beschleunigung jeweils in Terz-Bändern. Es erscheint sicher, daß sich die Wirkung der Bewegungen auf die Seekrankheit erhöht, wenn gleichzeitig in mehreren Terz-Bändern Beschleunigungen auftreten, oder wenn zusätzlich zu den vertikalen Beschleunigungen auch Beschleunigungen in anderen Richtungen oder Drehbeschleunigungen auftreten.



• Meßwerte, ○ Standard-Berechnungsmethode, □ H-Methode. $\mu = 150^\circ$

Bild 9. Erregende Kräfte in Wellen nach Messungen und zwei Berechnungsmethoden

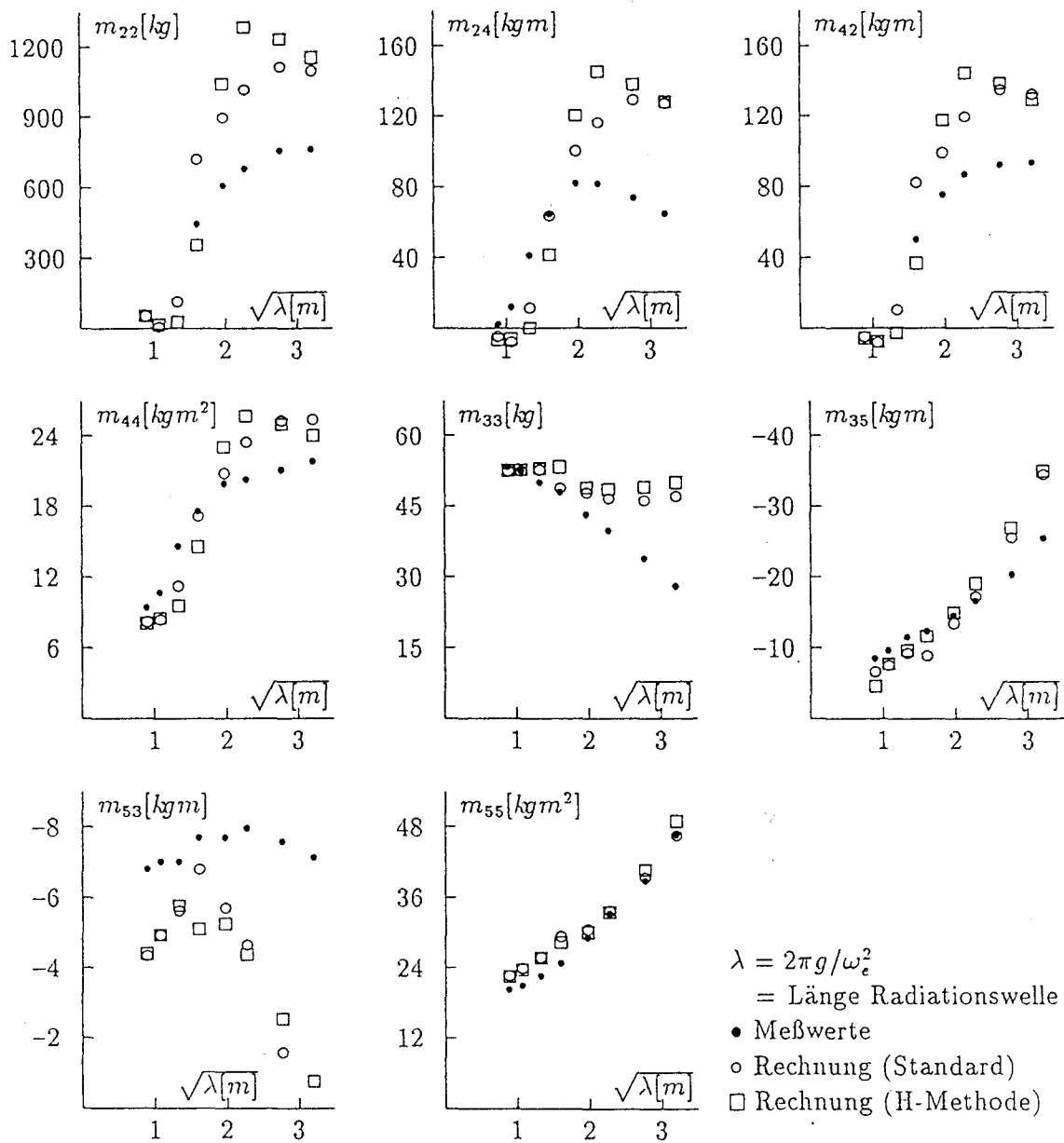


Bild 10. Hydrodynamische Masse nach Messungen und zwei Berechnungsmethoden

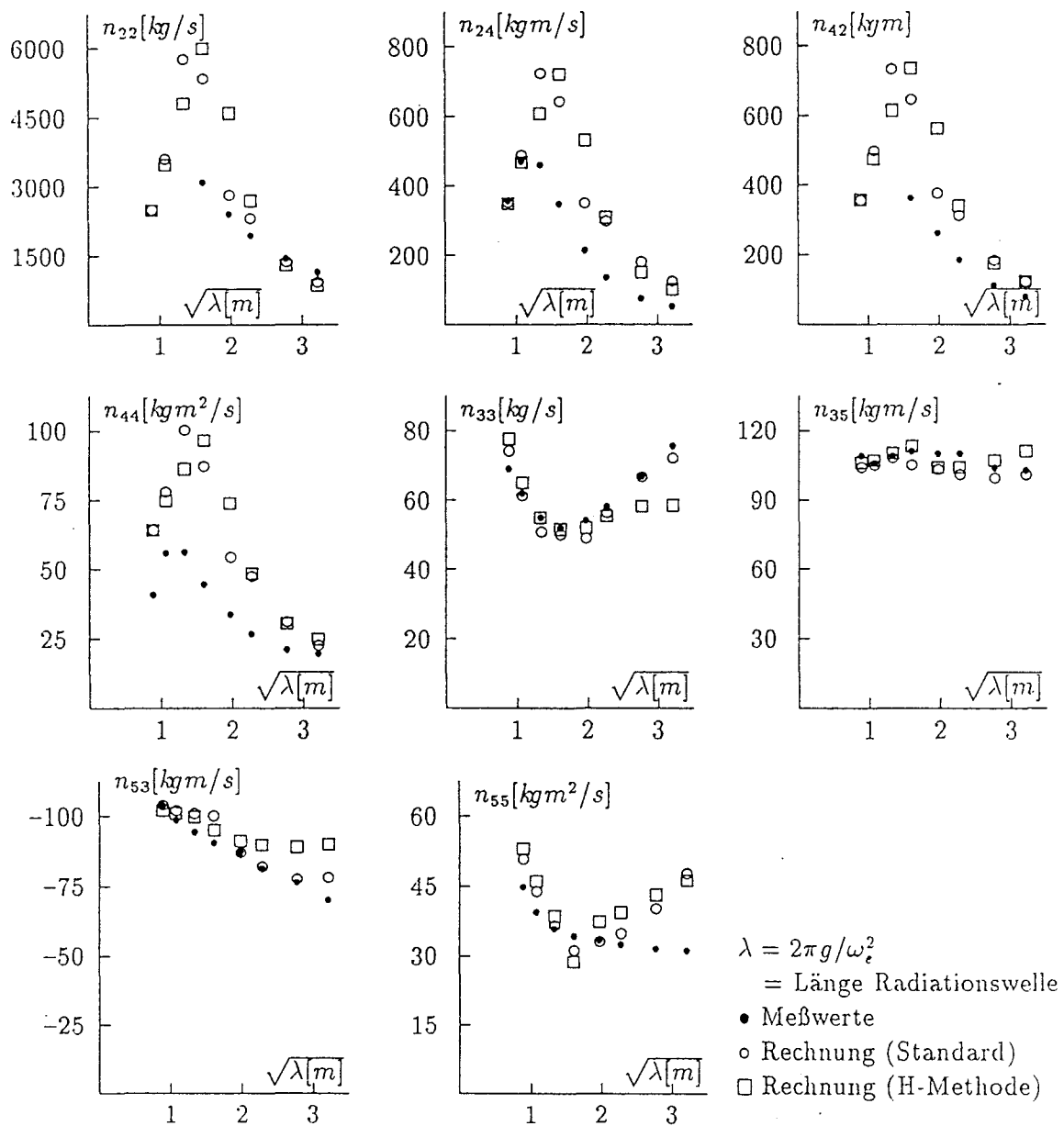


Bild 11. Hydrodynamische Dämpfung nach Messungen und zwei Berechnungsmethoden

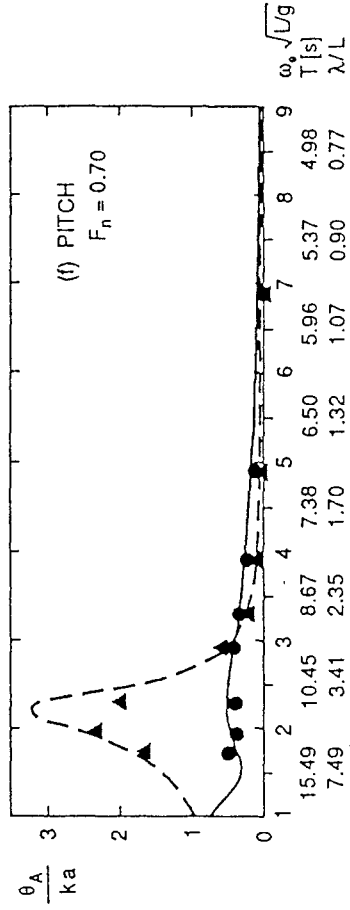
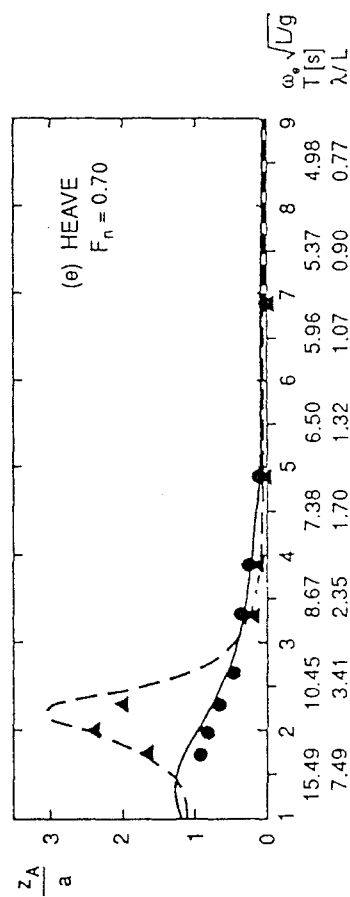
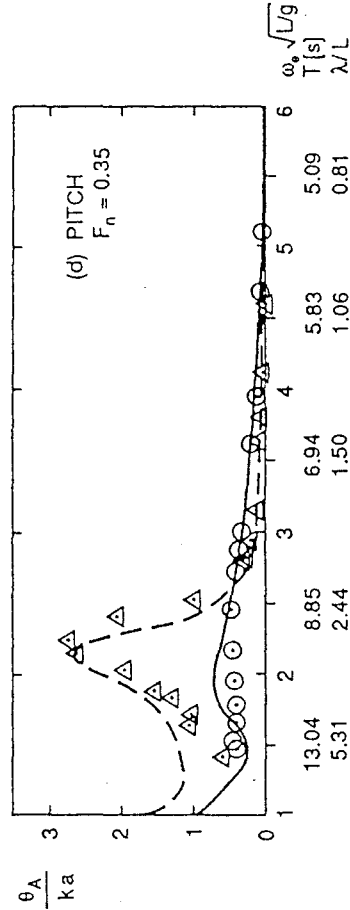
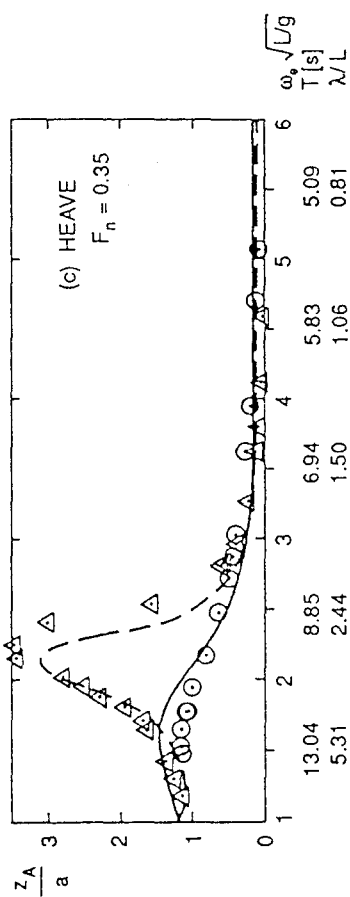
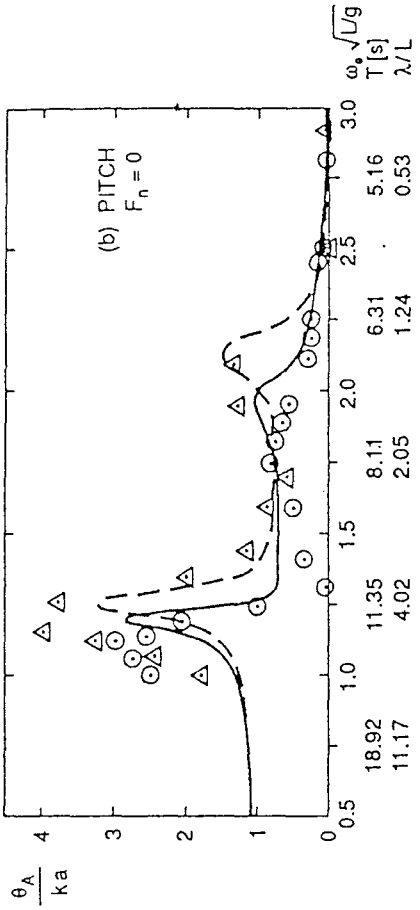
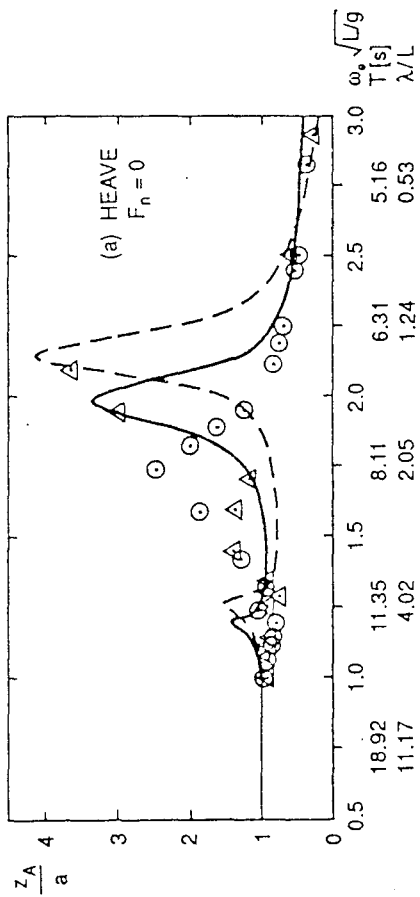


Bild 12. Tauch- und Stampfbewegung nach SEDOS (Kurven), Messungen (offene Symbole) und dreidimensionalen Berechnungen (schwarze Symbole) für ein SWATH ohne (gestrichelt) und mit (ausgezogen) Flossen. Nach Schellin und Papanikolaou (1991), $\mu = 180^\circ$

Im Folgenden werden zur Bewertung des Seeverhaltens die kennzeichnenden Amplituden, d.h. die doppelten Standard-Abweichungen, der vertikalen Beschleunigungen im Seegang gemeinsam über das gesamte Frequenzspektrum benutzt. Eine genauere Bewertung müßte berücksichtigen, daß nach der Norm bei Frequenzen über 0,315 Hz die Empfindlichkeit der Menschen für die Beschleunigung geringer ist als bei niedrigeren Frequenzen. Bei der untersuchten Schiffsgeschwindigkeit von 25 Knoten treten solche höheren Frequenzen in Seegang von vorn dann auf, wenn die Wellenperiode kürzer als etwa 7 s bzw. die Wellenlänge kürzer als etwa 75 m ist.

5 Beschleunigungen auf einem Fährschiff

Als Beispiel wird hier der SWATH-Entwurf einer Personenfähre benutzt, der von *Lee und anderen (1989)* beschrieben wurde. Das Schiff hat folgende Hauptabmessungen:

Länge der Rotationskörper 23,6m	Stützenlänge 24,6m
Abstand der Rumpf-Mittellinien 10,4m	Tiefgang 2,5m
Verdrängung 122 m ³	Geschwindigkeit 25 kn

Dies SWATH ist in Bild 14 dargestellt; es wird im Folgenden als Schiff A bezeichnet. Bild 14 wurde von einem Programm aus den Eingabedaten für die SEDOS-Berechnungen erstellt. Das Programm wurde entwickelt, nachdem sich herausgestellt hatte, daß es recht schwer ist, ohne solche grafischen Tests fehlerfreie Eingabedaten für die Seegangsberechnungen zu erzeugen. Das Bild zeigt außer den Schiffs-Spanten die Flossen (B am Backbordschwimmer, S am Steuerbordschwimmer) und ihre Drehachse, den Koordinaten-Nullpunkt O, auf den sich die Schiffsbewegungen beziehen, die Punkte P, an denen Beschleunigungen und Relativbewegungen berechnet werden, und Rechtecke, welche die Massenverteilung repräsentieren: Schwerpunkt, Trägheits- und Zentrifugalmomente hätten die angegebenen Werte, wenn die Masse gleichförmig in den angegebenen Rechtecken verteilt wäre.

Das SWATH ist mit großen Flossen ausgerüstet, damit es bei der relativ hohen Froudezahl $F_n = 0.84$ nicht selbsterregte Tauch- und Stampfschwingungen ausführt. Im folgenden werden Vertikalbeschleunigungen an dem vorderen Punkt P auf Steuerbord-Seite (Bild 14) diskutiert; der Punkt ist die für vertikale Beschleunigungen ungünstigste Stelle des Passagierraums. Bild 15 zeigt die Übertragungsfunktionen zwischen regelmäßigen Wellen und Vertikalbeschleunigung. Längere Wellen von hinten führen wegen der geringen Begegnungsfrequenz zu sehr geringen Beschleunigungen; dagegen können in kurzen Wellen aus allen Richtungen sowie in vorlichen oder seitlichen Wellen größerer Länge wesentliche Beschleunigungen auftreten.

In natürlichem, unregelmäßigem Seegang mischen sich die Einflüsse der verschiedenen Wellenlängen und -richtungen, so daß sich ein ordentlicheres Bild ergibt (Bild 16). Hier wurden JONSWAP-Spektren mit einer Spitzenüberhöhung von 3,3 und einer Winkel-Streuung entsprechen einer \cos^2 -Funktion angesetzt. Bild 16 zeigt, daß Seegänge aus vorlichen Richtungen in einem weiten Bereich von kennzeichnenden Perioden T_1 zu kennzeichnenden Amplituden von 0,7 bis 0,8 m/s² pro Meter kennzeichnende Wellenhöhe führen. Der kritische Wert der Vertikalbeschleunigung für 2 Stunden Expositionszeit nach ISO 2631 (kennzeichnende Amplitude 1 m/s²) wird in vorlicher See bei kennzeichnenden Wellenhöhen von rund 1,3 m erreicht. Besonders kompakt zeigt dasselbe Bild 17. Im Zentrum ist hier das SWATH schematisch von oben gesehen dargestellt. Richtung und Abstand vom Zentrum geben die Seegangsrichtung relativ zum Schiff bzw. die kennzeichnende Seegangs-Periode T_1 an. Die Zahl 0,85 gibt die maximale kennzeichnende Amplitude für 1 m kennzeichnende Wellenhöhe an, während die dick gezeichnete Linie den Bereich umschließt, in dem die kennzeichnende Beschleunigung zwischen 80% und 100% des Maximalwertes beträgt. Genau genommen hängt die Seegangswirkung davon ab, ob der Seegang von Backbord oder von Steuerbord kommt, weil der untersuchte Punkt außermittig auf Steuerbordseite liegt. Weil die Unterschiede in der Wirkung von Backbord-

und Steuerbordseegängen aber klein sind, zeige ich hier und im Folgenden nur Ergebnisse für Seegang von Steuerbord.

6 Vergleich verschiedener Schiffsversionen

Hier werden folgende Schiffsversionen miteinander verglichen:

- Schiff A: SWATH wie von *Lee und anderen (1989)* entworfen (Bild 14)
- Schiff B: Ein Katamaran ohne die für SWATH typische schmale Wasserlinie (Bild 18); Verdrängung und Spantflächenkurve, Flossen und Massendaten stimmen mit Schiff A überein.
- Schiff C: Wie Schiff A, jedoch ohne horizontale Flossen (aber einschließlich der zwei Ruder). Ein solches Schiff ist nicht funktionsfähig, weil es in ruhigem Wasser selbsterregte Stampfeschwingungen ausführt. Es wurde untersucht, um den Einfluß der Flossen auf die Schiffsbewegungen zu zeigen.
- Schiff D unterscheidet sich von Schiff A dadurch, daß die Flossen einen mittleren Anstellwinkel haben, so daß sie bei der Entwurfs-Froudezahl von $F_n = 0.84$ einen dynamischen Zusatz-Auftrieb von 765 kN erzeugen. Das Schiff kann daher statt 122 t Masse 200 t Masse haben. Die Unterwasserform und die Schwimmlage bei der Entwurfsgeschwindigkeit sind jedoch bei A und D gleich. Bei den benutzten Seitenverhältnissen der Flossen würde dieser dynamische Auftrieb mit einem erheblichen induzierten Widerstand erkauft; wenn man die Flossen dagegen schmaler, von Rumpf zu Rumpf reichend und mit einer Mittelstütze (für ausreichende Festigkeit) bauen würde, wäre der Zusatzwiderstand moderat und das Schiff insgesamt wohl erheblich billiger zu bauen bzw. zu betreiben, weil der für Schiff A notwendige Leichtbau und eine besonders leichte Antriebsanlage durch schwerere Ausführungen ersetzt werden könnten. Ebenso wie 'Foilcats' scheinen mir bei der hohen Froudezahl solche 'Foilswaths' sinnvoller als normale SWATHs zu sein.
- Schiff E unterscheidet sich von D dadurch, daß die horizontalen Flossen abhängig von der Tauch-, Stampf- und Rollbewegung gesteuert werden. Hier wurde eine sehr primitive Steuerung angenommen, die nur die Dämpfung der genannten Bewegungsarten erhöht und damit die Bewegungen bei geringen Begegnungsfrequenzen verringert.
- Schiff F kann man nicht mehr als SWATH bezeichnen, weil bei der Entwurfsgeschwindigkeit nur noch ein Rumpf ins Wasser taucht. Die Querstabilität wird hier durch eine Flosse auf der Steuerbordseite sichergestellt (Bild 19). Verdrängung und Masse (200t) entsprechen Schiff D. Da jetzt ein Rumpf die gesamte Verdrängung übernimmt, wurde seine Länge gegenüber Schiff D verdoppelt. Der untersuchte Punkt P liegt ebensoweit, nicht doppelt so weit vor dem Hauptspant wie bei Schiff D. Die für die Querstabilität notwendige Veränderlichkeit der Flossenkraft (sie kann durch aktive Steuerung oder automatisch bewirkt werden) wurde hier als so träge vorausgesetzt, daß sie im Seegang nicht wirksam wird.
- Schiff G unterscheidet sich von Schiff F durch eine aktive Steuerung der Flosse Nr. 7, welche die Querstabilität sichert. Es zeigte sich, daß hier eine simple Steuerung wie bei Schiff E (Anstellwinkel proportional zur Rollamplitude, aber gegenüber dieser um 90 Grad phasenverschoben) wenig hilft. Deshalb wurde die komplexe Amplitude des Anstellwinkels als $(-10 + 5i)$ mal komplexe Amplitude des Rollwinkels angesetzt (bei positiven Begegnungsfrequenzen; sonst der konjugiert komplexe Faktor). Praktisch würde man eine ähnliche Steuerung vielleicht durch Messung der Flossenkraft und davon abhängige Flossensteuerung realisieren können; eine Alternative wäre eine an Federn und Stoßdämpfern aufgehängte Flosse.

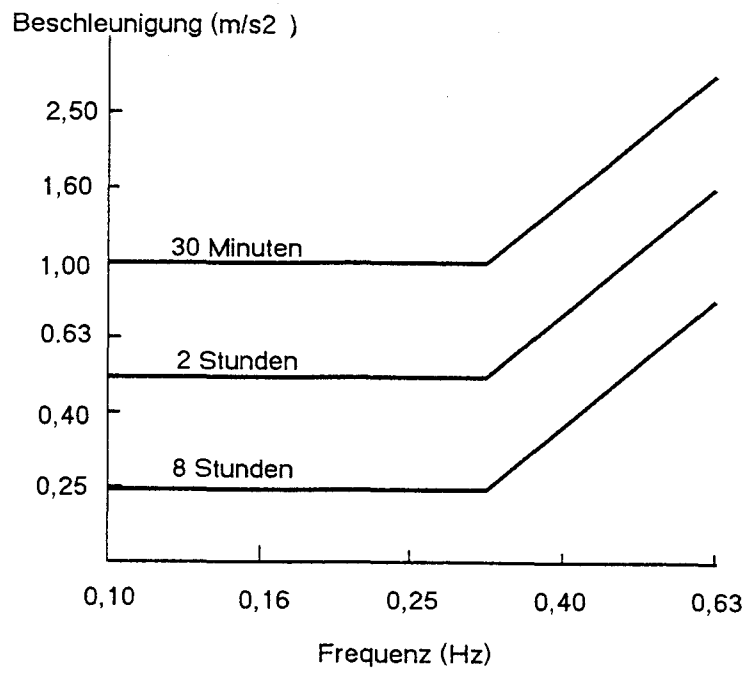


Bild 13. Standard-Abweichung der Beschleunigung, die nach ISO 2631/2 zu starkem Unwohlsein führt

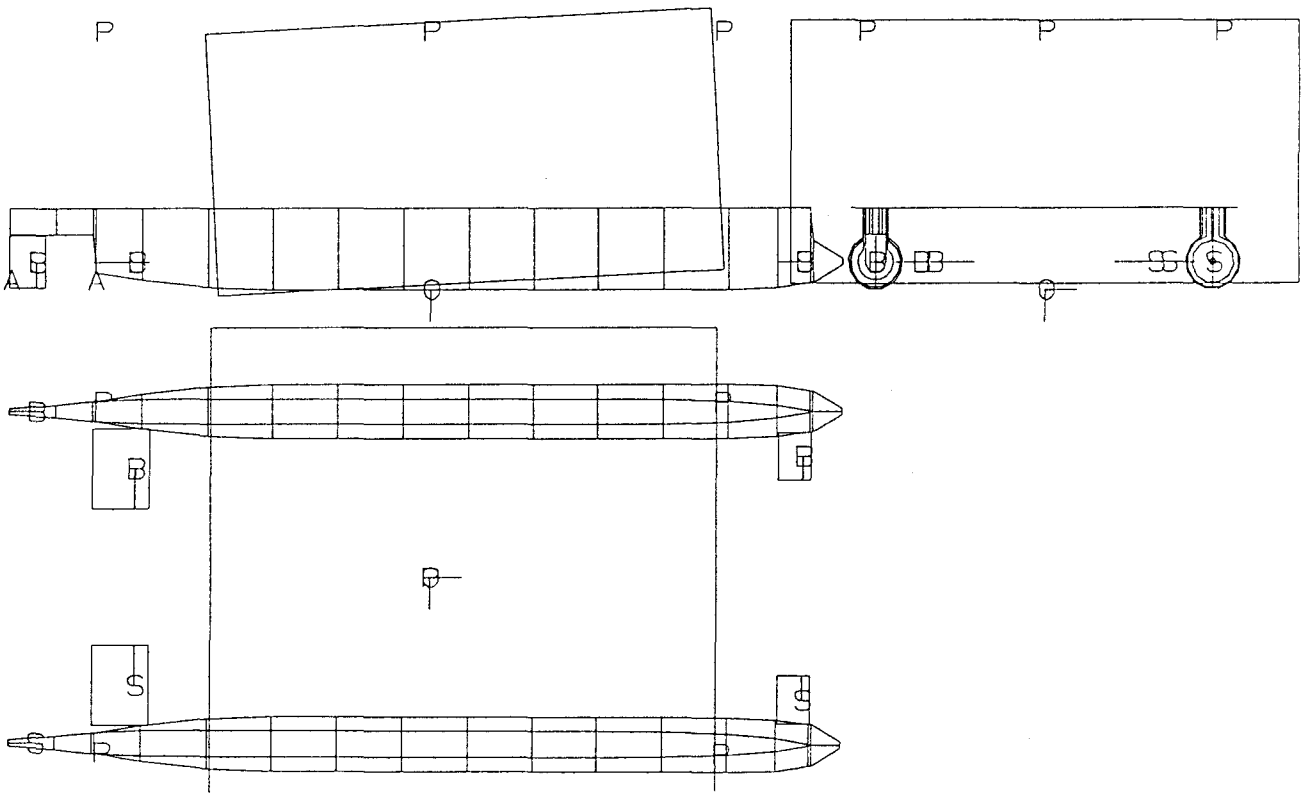


Bild 14. Testbild Schiff A

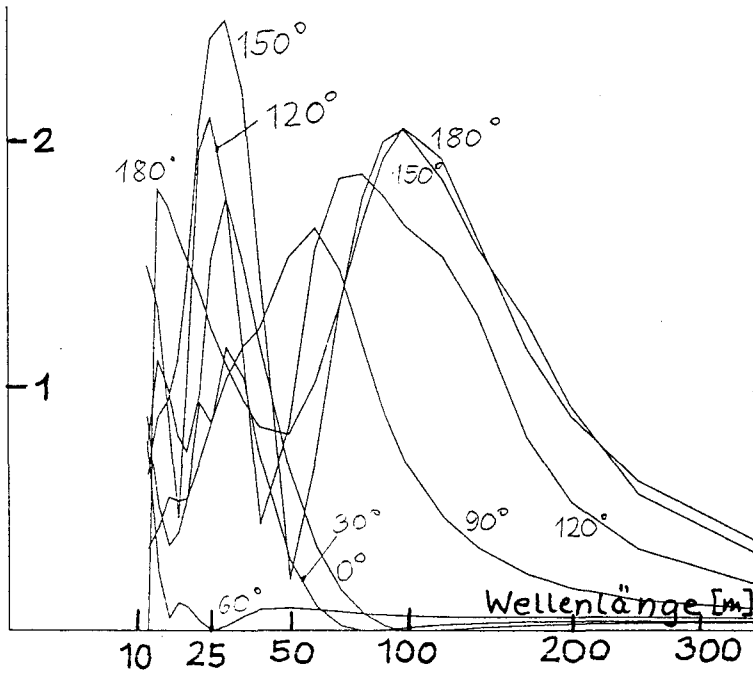


Bild 15. Übertragungsfunktion der Vertikalbeschleunigung in $1/s^2$. Schiff A, Punkt P vorn Steuerbord

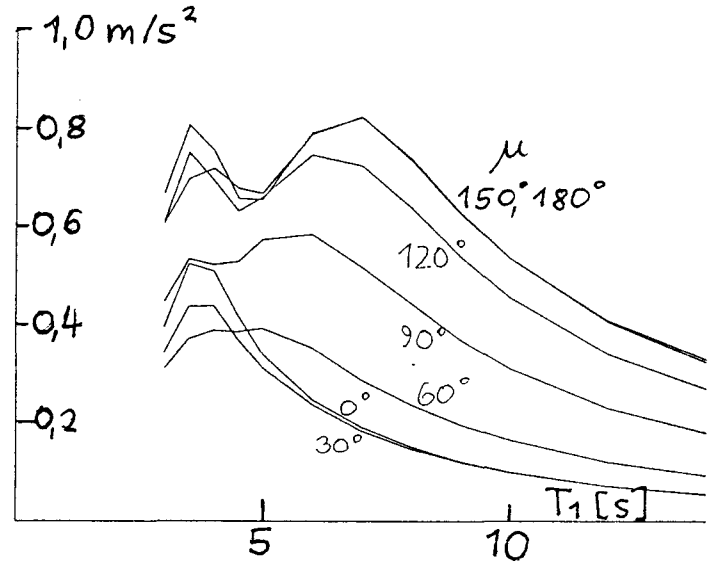


Bild 16. Kennzeichnende Amplitude der Vertikalbeschleunigung in Seegang von 1 m kennz. Höhe. Schiff A, Punkt P vorn Steuerbord

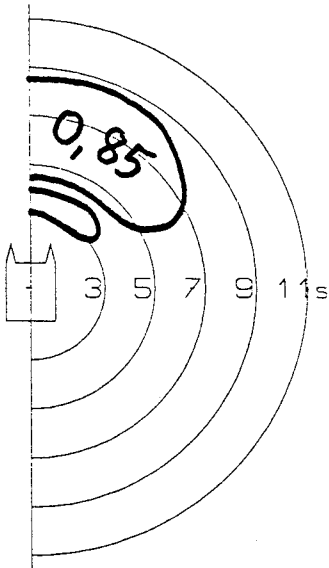


Bild 17. Kennzeichnende Amplitude der Vertikalbeschleunigung. Schiff A, P vorn Steuerbord (Bild 14). Seegänge von 1 m kennz. Höhe. Maximalwert und Bereich, in dem 80% des Maximalwertes überschritten sind.

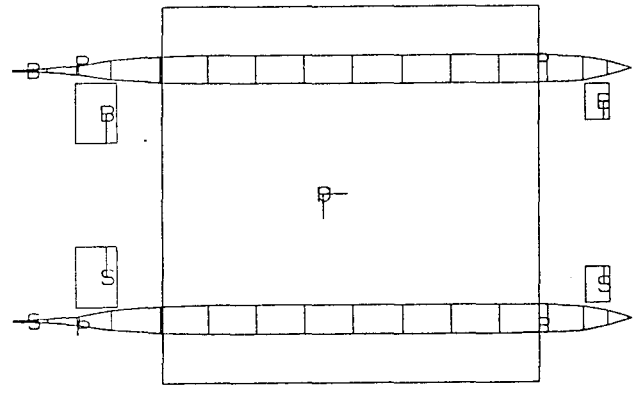
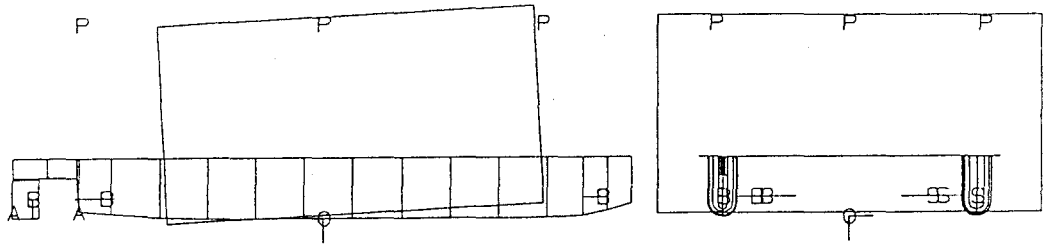


Bild 18. Testbild Schiff B

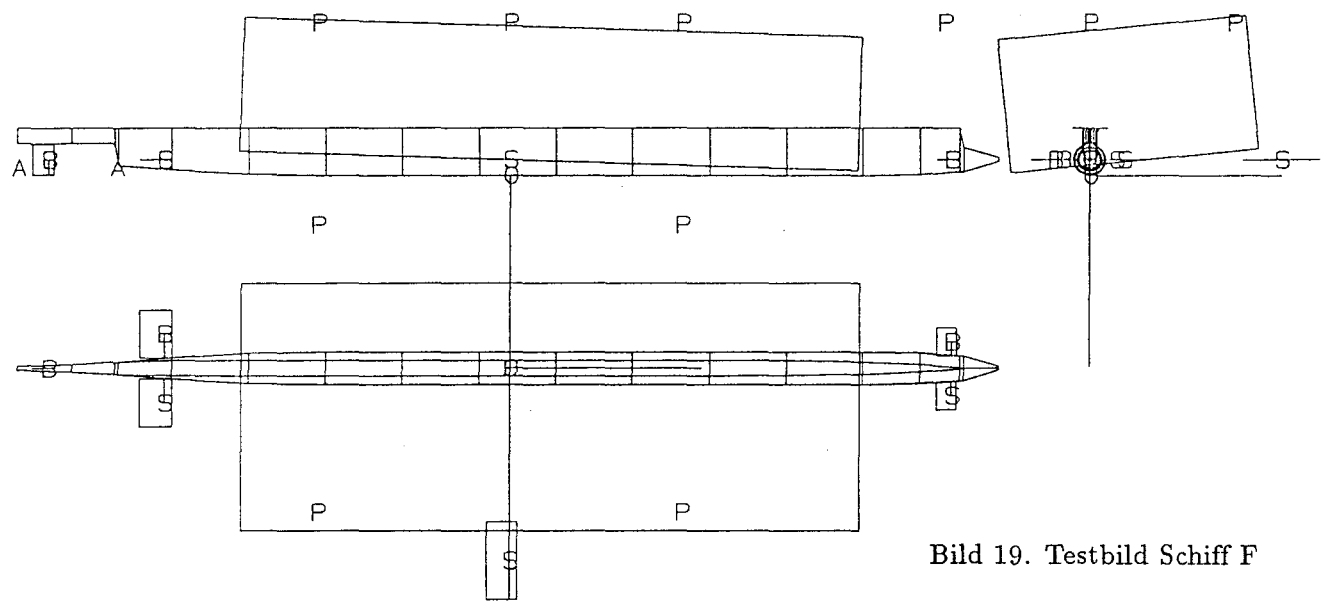


Bild 19. Testbild Schiff F

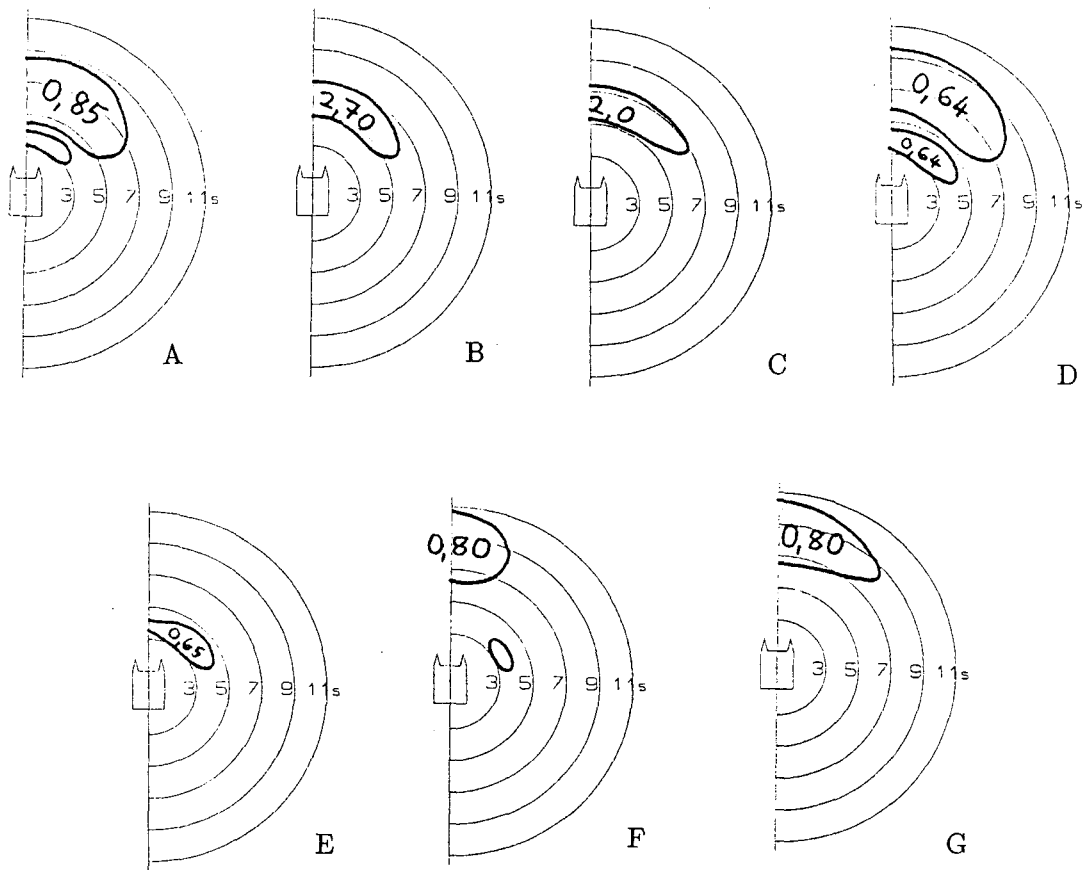


Bild 20. Kennzeichnende Amplitude der Vertikalbeschleunigung für Schiffe A bis G.

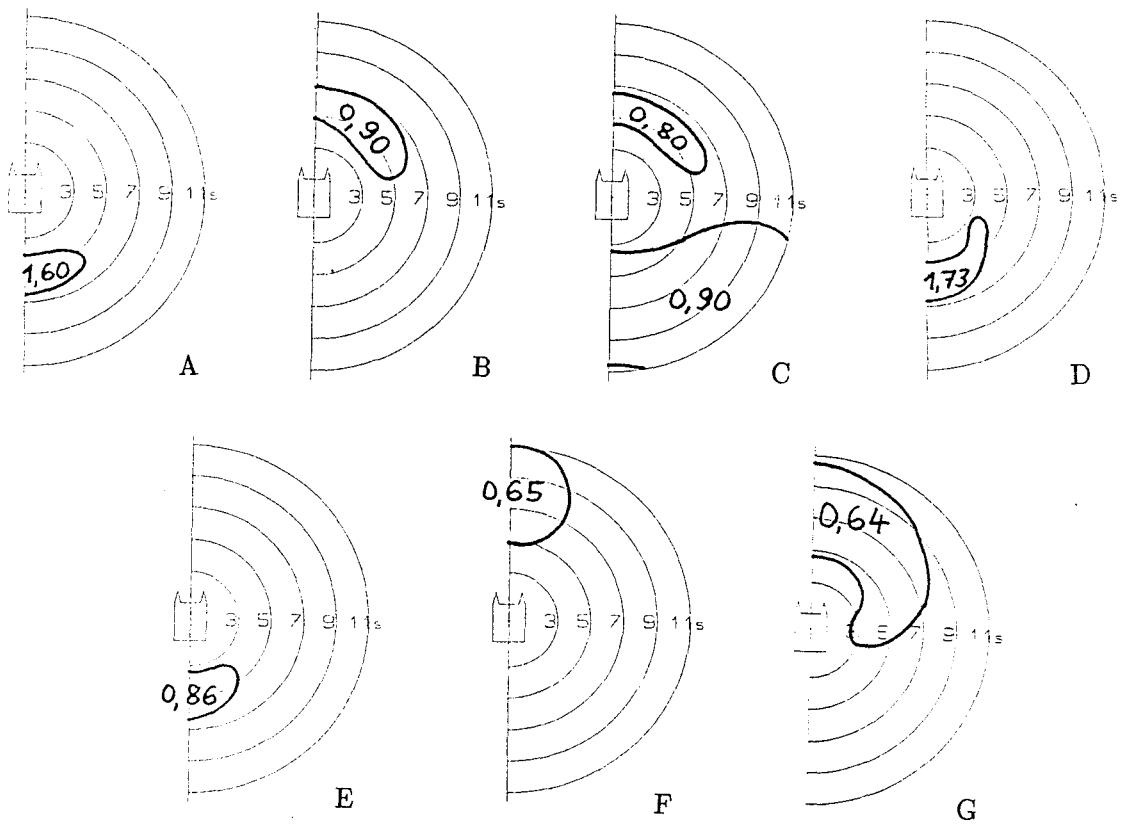


Bild 21. Kennzeichnende Amplitude der vertikalen Relativbewegung Schiff - Wasseroberfläche für Schiffe A bis G.

Bild 20 zeigt die Beschleunigungen der Schiffe A bis G in natürlichem Seegang von 1 m kennzeichnender Höhe aus unterschiedlichen Richtungen und mit verschiedenen kennzeichnenden Perioden. Das SWATH A hat, wie erwartet, tatsächlich wesentlich kleinere Beschleunigungen (Faktor 1/3) als der Katamaran B. Das liegt aber zum größten Teil an den großen Flossen; wie der Vergleich mit SWATH C zeigt, würde ein SWATH ohne Flossen fast ebenso große Beschleunigungen wie der Katamaran B haben. Eine Vergrößerung der Masse, die bei SWATH D durch dynamischen Flossenauftrieb möglich wird, hat – bei gleichen Abmessungen des Unterwasserschiffs – auch auf das Seeverhalten günstige Wirkung. Man könnte statt dessen das 'Foilswath' auch kleiner als ein normales SWATH bauen, so daß es etwa gleiches Seeverhalten bei gleicher Masse hätte, aber wegen der kleineren Rümpfe billiger wird und weniger Antriebsleistung erfordert. Bei längeren Seegangs-Perioden kann eine Flossensteuerung (Schiff E) die Beschleunigungen weiter herabsetzen; bei kurzer Seegangsperiode unterhalb von 5 s hilft die hier untersuchte einfache Flossensteuerung aber nicht. Das 'Auslegerschiff' F mit doppelt so langem Rumpf ohne aktivierte Flossen hat bei langperiodischem Seegang (über 6 Sekunden) schlechteres Seeverhalten, während sich in kurzperiodischem Seegang eine leichte Verbesserung gegenüber Schiff D ergibt. Mit gesteuerter oder nachgiebig befestigter Seitenflosse (Schiff G) bleibt das Verhalten in langperiodischem Seegang praktisch unverändert; dagegen können die Beschleunigungen in kurzperiodischem Seegang erheblich gemindert werden.

Bei allen untersuchten Schiffen treten die größten Vertikalbeschleunigungen in vorlichem Seegang (etwa zwischen 120 und 240 Grad Begegnungswinkel) auf.

7 Relativbewegungen zwischen Schiff und Wasseroberfläche

Die beschriebenen linearisierten Berechnungen sind zuverlässig, solange die Relativbewegungen zwischen Wasseroberfläche und Schiff so klein sind, daß weder die breiten Rotationskörper austauschen noch die verbreiterten Bereiche der Stützen (die Sponsons) eintauchen. Wesentliche Abweichungen von dem linearen Verhalten sind danach zu erwarten, wenn die Amplituden der Relativbewegungen deutlich größer als 1 m werden. Deshalb zeigt Bild 21, wie groß die kennzeichnende Amplitude der Relativbewegungen wieder bei dem Punkt P vorn auf Steuerbordseite wird. Dargestellt sind wieder Ergebnisse für die Schiffe A bis G in Seegang verschiedener Periode und Richtung. Die angegebenen Zahlen (in m) gelten für Seegang von 1 m kennzeichnender Höhe. Hier zeigt sich, daß das SWATH A in Seegang von hinten deutlich größere Relativbewegungen macht als der Katamaran B, bei dem vorliche Seegänge entscheidend sind. Schon bei 1 m kennzeichnender Höhe sind für SWATH A wesentliche nichtlineare Bewegungen zu erwarten. Der Vergleich mit Schiff C zeigt, daß die Flossen in achterlicher See die Relativbewegungen vergrößern. SWATH D mit größerer Masse und Flossenauftrieb macht in achterlicher See noch etwas größere Relativbewegungen; diese können aber durch eine einfache Flossensteuerung (Schiff E) wesentlich verringert werden. Die Auslegerschiffe F und G machen noch geringere Bewegungen, vor allem in achterlichem Seegang; hier treten die größten Relativbewegungen in vorlichem Seegang auf. Die Flossensteuerung bei Schiff G, die auf eine Verringerung der Beschleunigungen ausgelegt ist, vergrößert die Relativbewegungen bei seitlichem Seegang. Immerhin ist Linearität für diese Schiffe bis zu kennzeichnenden Wellenhöhen von 1,5 bis 2 m zu erwarten.

8 Zusammenfassung der Ergebnisse

- Die sachgerecht angewendete Streifenmethode liefert genaue Ergebnisse für die Tauch- und Stampfbewegungen schlanker Ein- und Zweirumpfschiffe zumindest bis zu $F_n = 0.8$.
- Die Koeffizienten der Quer-, Roll- und Gierschwingungen werden bei SWATH mit Fahrt voraus nach der Streifenmethode nicht korrekt berechnet. Dies ergibt Fehler in den Bewegungen bis zu etwa 20% beim Rollen und 100% bei der Querbewegung.

- Eine bessere Berücksichtigung der stationären Schiffsumströmung verringert diese Fehler nicht. Haupt-Ursache der Fehler dürften viskose Effekte sein.
- Das untersuchte SWATH von 24 m Länge macht bei 25 kn für Fahrgäste akzeptable Bewegungen in Seegang von 1 bis 1,5 m kennzeichnender Höhe.
- Ein ähnlicher Katamaran ohne eingeschnürte Wasserlinie und ohne Flossen macht etwa 3 mal so starke Bewegungen.
- Das günstige Verhalten des SWATH liegt zum größten Teil an den vorgesehenen und notwendigen großen Flossen.
- Diese Flossen können statischen Auftrieb liefern. Dies vergrößert nicht nur die zulässige Schiffsmasse, sondern verringert auch die Bewegungen im Seegang.
- In langperiodischem Seegang können die Schiffsbewegungen durch gesteuerte Flossen wesentlich verringert werden.
- Als Alternative zum SWATH wurde ein Auslegerschiff untersucht, das sich bei Dienstgeschwindigkeit auf einen SWATH-artigen Rumpf und einen Tragflügel zur Sicherung der Querstabilität stützt. Dies Schiff hat, insbesondere bei nachgiebig gelagertem Tragflügel, noch etwas günstigeres Seeverhalten.

9 Schrifttum

Keuning (1990), Distribution of added mass and damping along the length of a ship model moving at high forward speed, *Int. Shipb. Progr.* 37, 123-150

Blume, P. und Söding, H. (1993), Numerical simulation and validation for SWATH ships in waves, *Proc. FAST*

Hachmann, D. (1991), Calculation of pressures on a ship's hull in waves. *Ship Techn. Res.* 38, 111-133

Hachmann, D. und Söding, H. (1993), Bewegungen und Belastungen von Doppelrumpfschiffen unter Berücksichtigung nichtlinearer Einflüsse, Bericht an die MTG

Lee, K.-Y., Lee, D.-K. und Kim, Y.-D. (1989), A computer-based design model for coastal passenger SWATH ships, *Ship Techn. Res.* 36, 72-83

Schellin, T.E. und Papanikolaou, A. (1991), Prediction of seakeeping performance of a SWATH ship and comparison with measurements, *Proc. FAST 91*

Söding, H. und Blume, P. (1994), Experimentelle Prüfung von Berechnungsmethoden für die Bewegungen von Katamaranen im Seegang, in 'Schlaglichter der Forschung', ed. Rainer Ansoerge, *Hamburger Beiträge zur Wissenschaftsgeschichte Band 15*