

93 | 1962

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

S. Kastner

# Kenterversuche mit einem Modell in natürlichem Seegang

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

# Kenterversuche mit einem Modell in natürlichem Seegang

S. Kastner

Das Stabilitätsmoment eines Schiffes in natürlichem Seegang ist von einer Vielzahl von Einflußgrößen abhängig, die in ihrer komplexen Wirkung nur schwer quantitative Aussagen auf rein theoretischem Wege ermöglichen. Es liegt daher nahe, den Seegangseinfluß auf das Stabilitätsverhalten eines Schiffes experimentell zu untersuchen, und zwar unter weitgehend ähnlichen Bedingungen, denen ein naturgroßes Schiff auf See ausgesetzt ist. Versuche über die Schwankungen der Stabilität im Seegang sind u. a. von Arndt und Roden in einem Tank mit regelmäßigen Wellenzügen durchgeführt worden [1]. In Weiterführung dieser Arbeiten führten wir am Lehrstuhl für Entwerfen von Schiffen der Universität Hamburg im vorigen Jahr (1961) in Gemeinschaftsarbeit Modellversuche in natürlichem Seegang mit einem freifahrenden ferngesteuerten Modell durch. Hierbei untersuchten wir besonders das Kentern infolge Seegangseinwirkung.

## 1. Versuchseinrichtungen und Meßtechnik

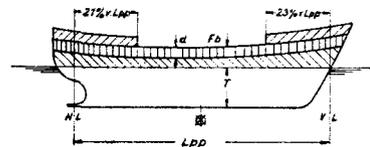
Die Modellversuche fanden auf einem großen Binnensee (Großer Plöner See, größte Ausdehnung 7 km) statt, wo die bei Windeinwirkung entstehenden Wellen als natürlicher Modellseegang benutzt wurden. In verschiedenen Kursen zur Wellenfortschrittsrichtung wurde das freifahrende Modell dem natürlichen Seegang ausgesetzt. Die Linien des Modells entsprachen denen eines normalen Frachtschiffes (Bild 1). Der 2 m lange Modellkörper war aus glasfaserverstärktem Epoxyharz gefertigt und wasserdicht verschlossen. Es wurden verschiedene Freiborde mit und ohne Aufbauten untersucht (Bild 2). Freiborderhöhen werden durch Aufkleben leichter, wasserabweisender Hartschaumplatten auf das wasserdichte Deck erreicht. Ebenso wurden Back und Poop aufgeklebt. Bild 3 zeigt eine Übersicht der Einbauten im Modell. Die Stromversorgung der Einbauaggregate erfolgte aus im Modell mitgeführten Nickel-Cadmium-Zellen. Zur Kursstabilisierung des Modells diente eine Geradlaufeinrichtung mit Kurskreisel und Proportionalrückführung, die Abweichungen vom vorgegebenen Kurs selbsttätig ausglich. Das Modell wurde ferngesteuert mit folgenden Funktionen: Fahrt voraus, Fahrt stop, Fahrt rückwärts, Kursänderung nach Backbord, Kursänderung nach Steuerbord; Messung ein und Messung aus. Wegen der speziellen Aufgabenstellung beschränkten wir die Aufzeichnung der Modellbewegungen auf die Bewegungen um die Längsachse, auf das Rollen. Es wurden Aufnehmer für den Scheinlotwinkel und für die Rollwinkelbeschleunigung eingebaut. Die Aufzeichnung

der Meßwerte erfolgte gleichfalls im Modell in einem Lichtstrahloszillografen mit hochempfindlichen Galvanometer-schleifen.

Zur Änderung des Gewichtsschwerpunkts des Modells diente ein Gewicht, das an einem Mast in der Höhe verschoben werden konnte. Es wurden mit dem Modell zur Bestimmung seiner Anfangsstabilität und Rollperiode Krängungs- und Rollversuche bei verschiedenen Höhenstellungen des Gewichts vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Bild 4 graphisch dargestellt. Die Pantokarenen wurden rechnerisch ermittelt.

Frachtermodell im natürlichen Seegang  
Hauptabmessungen

$L_{pp} = 200 \text{ cm}$   $\frac{L}{B} = 6,250$   
 $B = 32 \text{ cm}$   $\frac{H}{B} = 1,960$   
 $T = 16,3 \text{ cm}$   
Aufbautenhöhe  $4 \text{ cm} \approx 2 \text{ m}$  für  $d = 50$



Verschiedene untersuchte Freiborde

- 1)  $d = 0$   $\frac{L}{B} = 0,270$ ;  $\frac{H}{H} = 1,550$ ;  $\frac{L}{H} = 9,660$   
 $F_b = 4,4 \text{ cm}$   
 $H = 20,7 \text{ cm}$ 
  - 1a) wie 1), zusätzlich Poop und Back
  - 2)  $d = 2,0 \text{ cm}$   $\frac{L}{B} = 0,393$ ;  $\frac{H}{H} = 1,410$ ;  $\frac{L}{H} = 8,820$   
 $F_b = 6,4 \text{ cm}$   
 $H = 22,7 \text{ cm}$ 
    - 2a) wie 2), zusätzlich Poop und Back
  - 3)  $d = 4,0 \text{ cm}$   $\frac{L}{B} = 0,515$ ;  $\frac{H}{H} = 1,296$ ;  $\frac{L}{H} = 8,10$   
 $F_b = 8,4 \text{ cm}$   
 $H = 24,7 \text{ cm}$ 
    - 3a) wie 3), zusätzlich Poop und Back

Bild 2

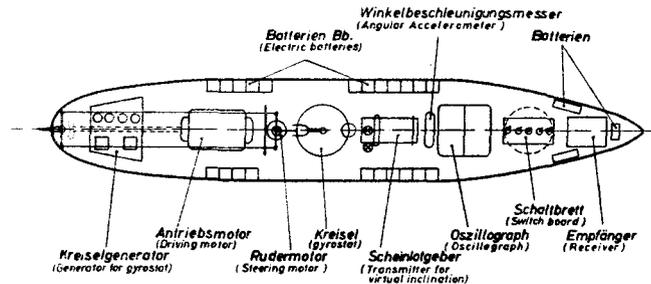


Bild 3 Übersichtsskizze der Einbauten im Modell

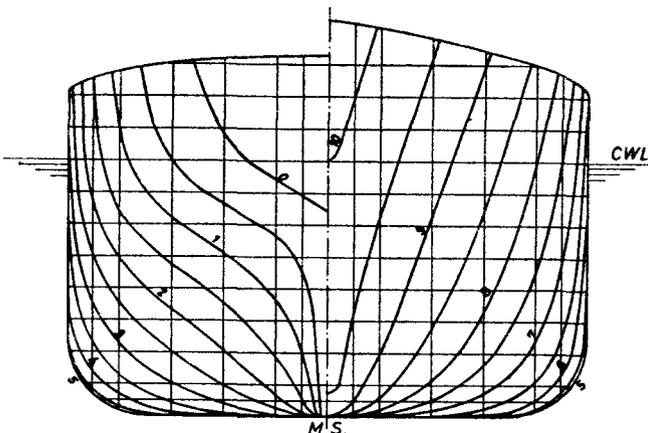


Bild 1 Spantenriß des Frachtermodells  
 $L_{pp} = 2,00 \text{ m}$   $B = 0,32 \text{ m}$   $H = 0,20 \text{ m}$

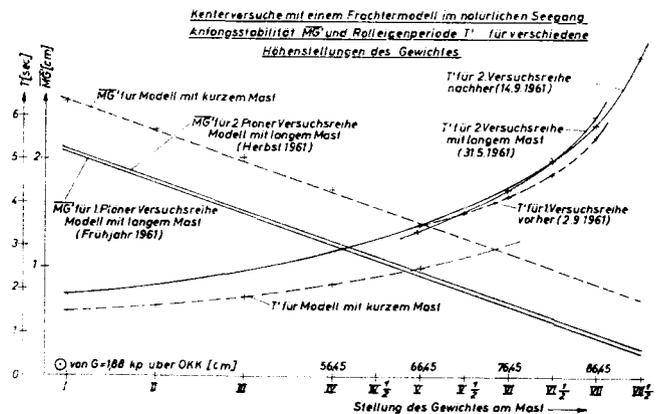


Bild 4

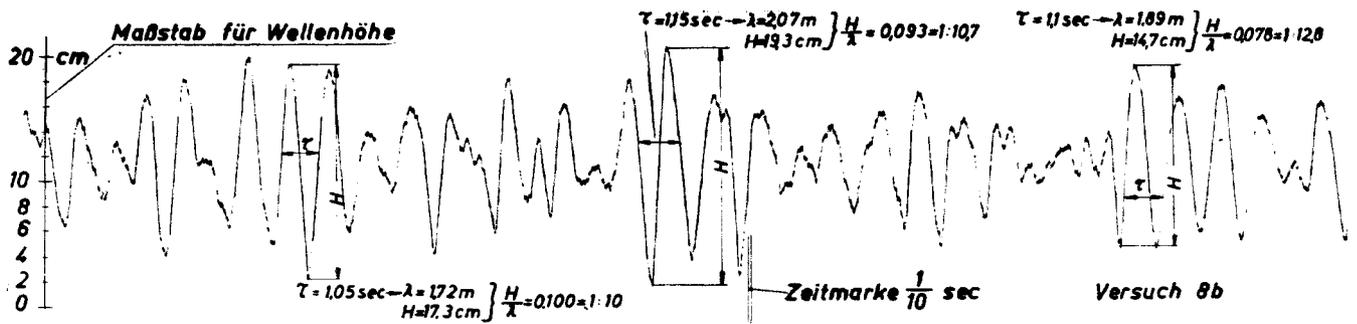


Bild 5 Seegangsaufzeichnung Wellenamplitude über der Zeit, Großes Plöner See, am 11. 9. 1961  
Windbahnlänge (Fetch)  $F' = 2 \text{ km}$  Windgeschwindigkeit  $w' = 4,5 \dots 5,5 \text{ m/sec}$

Zur Aufzeichnung des Modellseegangs befestigten wir eine von Roden entwickelte Wellenonde an einem Rohrgerüst, das wir auf dem Boden des Sees in etwa 6 m Tiefe aufgestellt hatten. Ein wasserdichtes Kabel führte von der Sonde an Land. Hier wurde die Wellenhöhe über der Zeit durch einen Schleifenzillografen mit vorgeschaltetem Verstärker aufgezeichnet.

Die während eines Versuches herrschende Windgeschwindigkeit bestimmten wir mit einem Staudruckmesser.

Alle Versuchsfahrten sind auf 16 mm Schmalfilm festgehalten worden. Das Modell, mit einer Geschwindigkeit von 1,2 m/s ausgelegt, entsprechend 16 kn für ein 100 m langes Schiff, begleiteten wir mit einem Ruderboot. Anschließend an diesen Bericht werden einige repräsentative Kenterfälle im Film vorgeführt werden. Die Versuche wurden immer in Wellen mit einer ausgeprägten Fortschrittsrichtung und einer Länge von etwa gleich Modelllänge bei einer erzeugenden Windgeschwindigkeit von 3 bis 5 m/s durchgeführt.

## 2. Analyse des Modellseegangs

Einen Ausschnitt aus einer Seegangsaufzeichnung zeigt Bild 5. Hierin wird besonders das Auftreten von Wellengruppen deutlich.

Um ein klares Bild über die Struktur des Modellseegangs zu erhalten, wurde die Seegangsfunktion  $Z(t)$  harmonisch analysiert. Aus apparativen Gründen wurde der Seegangsschrieb in 80 cm lange Streifen entsprechend 80 sec Meßdauer zerlegt und die Seegangsfunktion in ein Schwarz-Weiß-Profil umgezeichnet. Nach Fourier wird die Seegangsfunktion in eine trigonometrische Reihe zerlegt, die sich darstellen läßt als

$$Z_K(t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_{nK} \sin(n \omega_1 t + \psi_{nK})$$

wo  $c_{nK}$  die jeweiligen Amplituden  
 $n$  die Ordnungszahl  
 $\omega_1$  die Grundkreisfrequenz  
 $K$  die Streifennummer  
 $\psi_{nK}$  die Zufallsphase  
und  $t$  die Zeit sind.

Es gilt dann auch

$$n \cdot \omega_1 = \omega_n = n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t = 2\pi \cdot f_n \cdot t.$$

Hier ist  $\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{80} = 0,0785 \text{ sec}^{-1}$ .

Die Analyse liefert nun für die einzelnen Ordnungszahlen  $n$  die zugehörigen Amplituden  $c_{nK}$  für die einzelnen Streifen. Bild 6 zeigt das Amplitudenspektrum für einen dieser Streifen in stilisierter Form. Die anfallenden Amplitudenspektren sehen sehr unterschiedlich aus, da die auf einem Streifen ent-

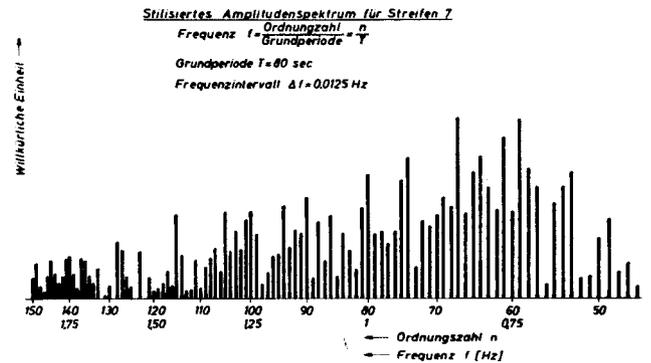


Bild 6

haltene Meßdauer von 80 sec im statistischen Sinne noch zu gering ist.

Das sogenannte „Seegangsspektrum“  $S_K(f_n)$  ergibt sich aus den Werten  $c_{nK}$  nach der Beziehung

$$S_K(f_n) = \frac{c_{nK}^2}{\Delta f}$$

Das Seegangsspektrum wird nun normiert, d. h. die Fläche unter der Kurve  $r^K(f_n)$  wird gleich eins gesetzt:

$$\sum_{n=1}^{\infty} S_K(f_n) \Delta f = 1.$$

Die Funktion  $S_K(f_n)$  stellt dann den prozentualen Anteil der einzelnen Frequenzintervalle am Gesamtenergieinhalt des Seegangs dar. Aus so ermittelten Verteilungsdichte- und Verteilungsfunktionen der K-Streifen wurden die Mittelwerte gebildet, und zwar hier über 9 Streifen. Das entspricht der Auswertung einer Seegangsfunktion über  $9 \times 80 \text{ sec}$  gleich 12 min.

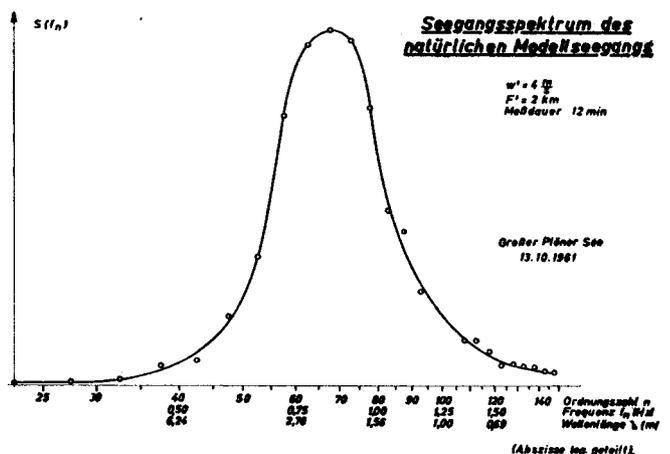


Bild 7

Auf diese Weise erhält man eine recht ausgeglichene Kurve. In Bild 7 ist das normierte Seegangsspektrum eines über 12 Minuten gemessenen natürlichen Modellseegangs wiedergegeben, hier also

$$\frac{1}{9} \cdot \sum_{K=1}^9 S_K(f_n).$$

Die entsprechende Verteilungsfunktion, hervorgegangen aus

$$\sum_{n=25}^{150} \sum_{K=1}^9 S_K(f_n) \Delta f = 1.$$

ist in Bild 8 im sogenannten Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmisch geteilter Abszisse aufgetragen. Durch die Punkte läßt sich näherungsweise eine Gerade legen, d. h. das Spektrum der natürlichen Modellsee entspricht einer Gauß-Verteilung. Der lineare Mittelwert  $n_a$  ergibt sich hier zu  $n_a = 73$ , damit  $f_{n_a} = 0,913$  Hz, das entspricht nach der klassischen Formel

$$\lambda = \frac{g}{2\pi f_n^2}$$

einer effektiven Wellenlänge von  $\lambda_{eff} = 1,88$  m.

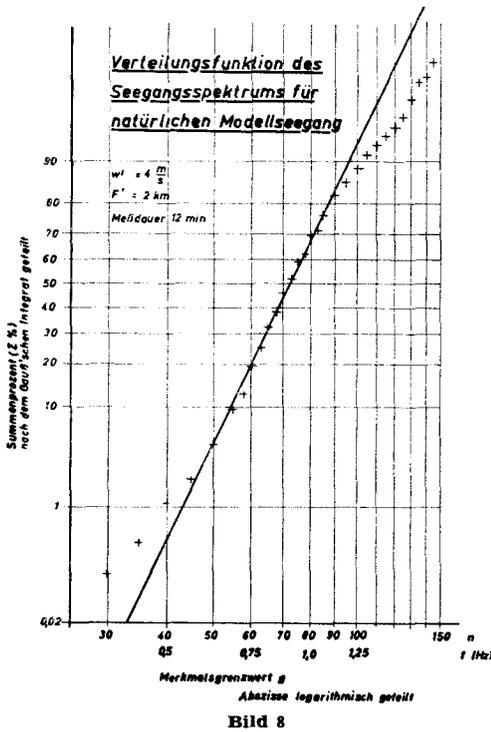


Bild 8

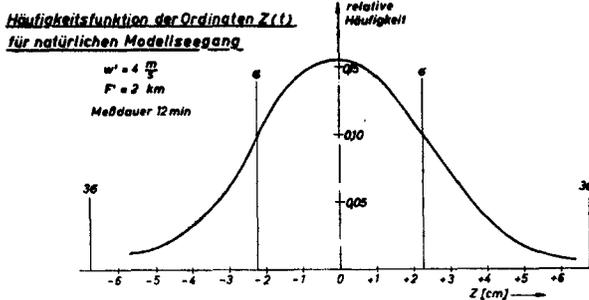


Bild 9

Betrachtet man nun ferner die Seegangsfunktion  $Z(t)$  auf den Streifen, so läßt sich eine Nullachse finden, für die in erster Näherung gilt:

$$\frac{1}{T} \int_0^T Z_K(t) dt = 0.$$

wo  $T = 80$  sec für diesen Fall, d. h. nimmt man den Mittelwert aller Ordinaten  $Z_K$ , so fällt er in die Achse Null. Die Schwankungen der Ordinate  $Z_K$  um diese so gefundene Achse lassen sich ausdrücken durch

$$\frac{1}{T} \int_0^T [Z_K(t)]^2 dt.$$

Die Werte für die entsprechende Verteilungsfunktion wurden für die  $K = 9$  Streifen apparativ bestimmt und wieder ihre Mittelwerte gebildet, graphisch dargestellt in Bild 10. Die Häufigkeitsfunktion der Ordinaten  $Z_K(t)$  entspricht also auch einer Gauß-Verteilung, da sich in Bild 10 recht gut eine Gerade ergibt. Die Häufigkeitsfunktion von  $Z(t)$  ist in Bild 9 normiert dargestellt.

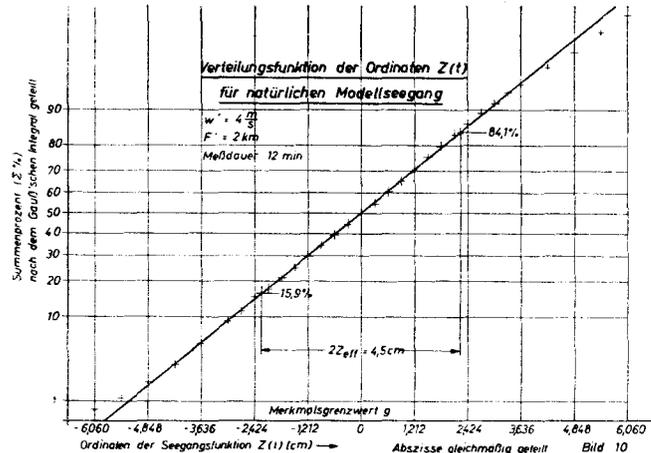


Bild 10

Sie gibt die relative Häufigkeit an, mit der die Ordinaten  $Z_K(t)$  eine bestimmte Höhe annehmen. Die effektive Ordinate läßt sich hier bestimmen zu

$$Z_{eff} = 2,25 \text{ cm}.$$

Seegangsspektrum und Ordinatenhäufigkeit des gemessenen natürlichen Modellseegangs folgen also einer Normalverteilung. Damit kann die Ähnlichkeit der für die Stabilitätsuntersuchungen herangezogenen natürlichen Modellwindsee mit naturgroßer See als erwiesen gelten. Der Seegang, dem das Modell ausgesetzt wurde, besitzt in dem analysierten Fall eine Welle größter Energie mit der Länge  $\lambda_{eff}$  von 1,88 m, was etwa der Länge des Modells entspricht ( $L_{pp} = 2,00$  m).

Zu bemerken ist, daß der Seegang an einem festen Standort im Operationsgebiet des Modells gemessen wurde, nie aber direkt an der Stelle des Kenterns. Die einzelnen Wellen also, die das Modell passieren, sind nicht gemessen worden. Die Seegaugsaufzeichnung dient lediglich dem Zweck, die Ähnlichkeitsbeziehungen zur „großen“ See zu prüfen und herzustellen.

### 3. Betrachtung der Kentervorgänge

Fährt das Modell parallel zur See mit einer Stabilität, die in vor- oder achterlichem Seegang zum Kentern führt, so kentert es bei diesem Kurs nicht. Diese Erkenntnis steht mit praktischen Erfahrungen auf See und mit theoretischen Überlegungen in Einklang. Wer legt daher mehr Wert auf die Untersuchungen in vor- und achterlichem Seegang. Dabei wurde nun erwartet, daß das Modell bei einem konstanten Freibord und einem bestimmten Seegang unterhalb eines MG-Wertes mit Gewißheit kentert, oberhalb eines größeren MG-Wertes mit Gewißheit nicht kentert. Der Abstand dieser beiden MG-Werte erwies sich als recht gering. Dies bedeutet, daß es möglich ist, den Seegangseinfluß auf die Stabilität eines Schiffes quantitativ zu bestimmen und des weiteren, daß man für ein Seeschiff

eine mindestens erforderliche Glattwasserstabilität angeben kann, die ihm eine ausreichende Kentersicherheit im Seegang verleiht.

Da die Schiffsform als ein wesentlicher Parameter eingeeht, sind hier weitere Versuche dieser Art mit anderen Schiffstypen von Nutzen. Mit den bisher durchgeführten Versuchen soll vorerst ein Weg zur experimentellen Behandlung der Kentersicherheit im Seegang gezeigt werden, wobei man auch Aufschlüsse über den Ablauf des Kenterns infolge natürlichen Seegangs erhält.

Für das Kentern ist zumeist eine Gruppe aufeinanderfolgender größerer Wellen etwa gleicher Intensität erforderlich, sowohl bei vor- als auch bei achterlichem Seegang. Als wesentlich zu beobachten ist das Überspülen von Seite Deck durch einen Wellenberg, der das Kentern einleitet. Jede weitere am Modell entlanglaufende Welle neigt es um einen gewissen Winkel nach derselben Seite weiter. Reicht jedoch die Zahl der folgenden hohen Wellen nicht aus, richtet sich das Modell aus seiner schon sehr unsicheren geneigten Lage wieder auf und kentert nicht.

Die Bilder 11 und 12 zeigen zwei Meßschriebe repräsentativer Kenterfälle. Beigegeben sind die für den jeweiligen Zustand des Modells gültigen Stabilitätswerte für Glattwasser. In den Meßschrieben sind der Scheinlotwinkel und die Rollwinkelbeschleunigung über der Zeit aufgezeichnet.

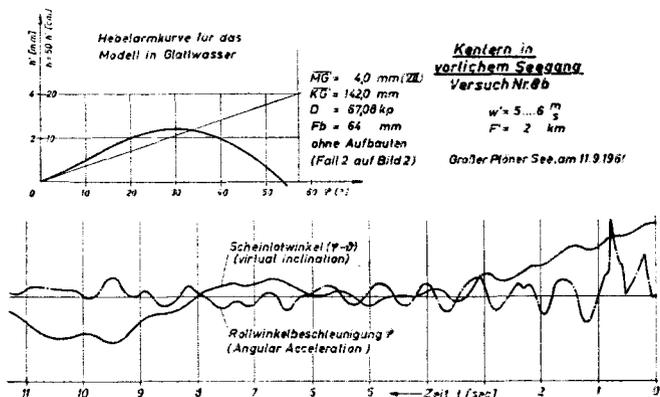


Bild 11

Bild 11 zeigt ein Kentern in vorlichem Seegang. Die Winkelbeschleunigung registriert deutlich die am Modell vorbeilaufenden Wellen. Das Modell wird aus einer Rollbewegung mit geringen Amplituden heraus nach einer Seite geneigt und kentert, hier durch etwa fünf Wellenzüge.

Bild 12 zeigt ein Kentern in achterlichem Seegang. Die Hebelarmkurve besitzt hier geringeren Umfang als in Bild 11 infolge geringeren Freibords, die Anfangsstabilität ist dagegen größer. Das Umkippen nach der Seite erfolgt hier ebenfalls infolge mehrerer Wellenzüge.

Beide Kenterbeispiele wurden im anschließenden Film gezeigt.

Zur Frage, inwieweit Störungen anderer Art als infolge Seegang das Kentern beeinflussen könnten, wäre vor allem der Einfluß des Ruderlegens zu untersuchen.

Wir führten mit dem Modell Drehkreisversuche mit Hart- ruderlagen in glattem Wasser durch, um die Stabilität zu erhalten, bei der das Schiff im Drehkreis kentert. Diese erwies sich als gering im Vergleich zur Stabilität, bei der das Modell im Seegang kentert.

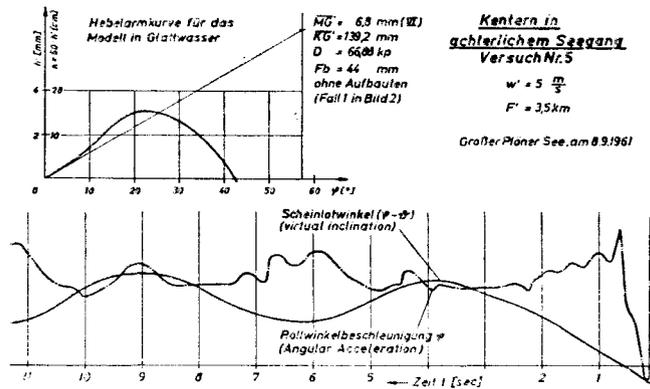


Bild 12

Praktisch werden während der Seegangsversuche keine Hart- rudermanöver durchgeführt, da jede Ruderbetätigung über Fernsteuerung während der Meßfahrt unterbleibt. Die bei einer Kursabweichung des Modells eingeleitete Ruder- drehung wird über eine einstellbare Proportionalrückführung auf die Geberscheibe am Kreisler rückgekoppelt, so daß hier- durch zu große Ruderausschläge vermieden werden. Die Ruderausschläge zur Kursstabilisierung durch die Kreisler- anlage belaufen sich damit maximal auf etwa  $\pm 5^\circ$ , die völlig unwesentliche krängende Momente liefern.

Betreffs der theoretischen Auswertung der bei diesen Ver- suchen erzielten experimentellen Ergebnisse verweise ich auf die Arbeit von Roden auf den folgenden Seiten. Ich möchte es nicht versäumen, der Deutschen Forschungsgemeinschaft zu danken, daß sie diese Untersuchungen ermöglichte. Ferner danke ich der Plöner Hydrobiologischen Anstalt der Max-Planck-Gesellschaft, die unsere Arbeit am Plöner See freundlichst unterstützte. Dank gebührt ferner Herrn Dr. Christoph vom Deutschen Hydrographischen Institut für die instrumentelle Durchführung der Seegangsanalysen und nicht zuletzt Herrn Herrmann vom Institut für Schiffbau, der uns in filmtechnischen Fragen tatkräftig zur Seite stand.

#### 4. Zusammenfassung

Die Durchführung von Kenterversuchen mit einem fern- gesteuerten freifahrenden Modell auf einem Binnensee wird beschrieben. Die auf dem See entstehende und als Modellsee- gang benutzte natürliche Windsee wurde analysiert. Das Er- gebnis beweist Ähnlichkeit der Modellsee mit „großer“ See. Damit sind die Vorgänge auf große Schiffe im natürlichen See- gang übertragbar.

Je ein Beispiel für Kentern im vor- und achterlichem See- gang wird an Hand der Meßwerte Scheinlotwinkel ( $\varphi - \theta$ ) und der Winkelbeschleunigung  $\ddot{\varphi}$  gezeigt.

(Vorgetragen am 27. Januar 1962)

#### Schrifttum

- [1] B. Arndt und S. Roden: „Stabilität bei vor- und achterlichem Seegang.“ Schiffstechnik Bd. 5 (1958) — Heft 29, S. 192/199.
- [2] P. Christoph: „Über die Analyse der Schlingerbewegung eines im Seegang befindlichen Schiffes, speziell durch- geführt an Schlingerregistrierkurven von V. F. S. „Gauß“.“ Deutsche Hydrographische Zeitschrift Band 13 (1960), Heft 5, S. 229/253.
- [3] H. Bartsch: „Statistische Methoden zur Untersuchung der Bewegungen eines Schiffes im Seegang.“ „Schiffstechnik Bd. 6 (1959), Heft 30, S. 1/8 und Heft 31, S. 85/92.