

94 | 1962

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

S. Roden

Welche Ergebnisse liefern Kenterversuche mit Modellen?

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Welche Ergebnisse liefern Kenterversuche mit Modellen?

S. Roden

Zunächst soll eine zusammenfassende Übersicht über die Arten von Meßdaten, die man bei den von Kastner [3] beschriebenen Modellversuchen erhält und die dabei vermittelten Informationen gegeben werden.

1. Aufzeichnung der Wellen an einem Punkt im Fahrbereich des Modells und Beobachtung der Windgeschwindigkeit. Durch Vergleich der damit gewonnenen Wellenspektren mit Spektren „ähnlichen“ Seegangs soll versucht werden, annähernde Übereinstimmung der Verteilung festzustellen und darüber hinaus ein wenigstens im Modellmaßstabbereich anwendbares Gesetz zu finden.

2. Aufzeichnung der Rollwinkel und der -winkelbeschleunigungen. Durch Vergleich der Spektren mit bei ähnlichen Schiffen erhaltenen, soll das ähnliche dynamische Verhalten des Modells überprüft werden. Darüber hinaus wird durch sie der eigentliche Kentervorgang einer Analyse zugänglich.

3. Filme der Modellfahrten. Qualitative Beurteilung des Seegangs im Bereich des Modells, besonders beim Kentern, und der Veränderungen der Wellen durch das Modell.

4. Beobachtungskollektive. Ihre statistische Analyse soll Grenzwerte für ausreichende Stabilität in Abhängigkeit von wesentlichen Parametern ergeben und damit Kriterien für individuelle Stabilitätsbemessung liefern.

Über die ersten drei Meßdatenarten wurde von Kastner ausreichend berichtet, die vierte ist das eigentliche Thema dieses Beitrags.

Bild 1 gibt einen Überblick über die verwertbaren Beobachtungen und die dazugehörigen Kenndaten des Modells. Bei allen Untergruppen erscheinen im wesentlichen je zwei MG-Werte.

Zweifelloos ist das vorliegende Material für eine statistische Auswertung recht dürftig, es kann aber gezeigt werden, daß sich trotzdem brauchbare Aussagen mit ausreichender Sicherheit machen lassen.

Nr.	Windgeschw. (m/sec)	Windbghn (km)	Freibord (cm)	MG (cm)	+Kentern -Kent.	Dauer der Meßfahrt (sec)	Kenternzeit (Sec)
1	4-5	2,5	4,4	0,68	+	28	4,2
2	4-5	2,5	4,4	0,82	+	28	4,8
3	4-5	2,5	4,4	0,68	+	32	4,8
4	35-45	2	4,4	0,65	+	36	7,2
5	4-5	1	4,4	0,65	+	60	5,0
6	4	1	4,4	0,65	+	60	5,0
7	35-45	2	4,4	0,65	+	60	6,4
8	4-5	1	4,4	0,65	+	80	3,0
9	4-5	1	4,4	0,65	+	80	5,0
10	4	1	4,4	0,65	+	80	5,0
11	45-5	1	4,4	0,65	+	140	6,4
12	4-5	1	4,4	0,65	+	194	5,6
13	4-5	1	4,4	0,93	-	480	
14	35-45	2	4,4	0,79	-	480	
15	4-5	1	4,4	0,93	-	600	
16	3-5	1,5	4,4	0,96	-	600	
17	45-55	2	6,4	0,30	+	52	4,0
18	3-5	1,5	6,4	0,30	+	132	4,2
19	3-5	1,5	6,4	0,44	-	80	
20	3-5	2	6,4	0,44	-	144	
21	3-5	2	6,4	0,58	-	128	
22	4	2	4,4+B+P	0,49	+	20	6,8
23	4	2	4,4+B+P	0,49	+	24	3,6
24	4	2	4,4+B+P	0,49	+	68	4,4
25	4	2-3	4,4+B+P	0,63	-	348	

Bild 1 Fahrt gegen die Wellen

- a) Freibord = 4,4 cm
- b) Freibord = 6,4 cm
- c) Freibord = 4,4 cm u. Poop u. Back

Das zur Zeit der einzelnen Meßfahrten vorhandene Wellenspektrum ist von der herrschenden Windgeschwindigkeit und der Windbahnlänge bestimmt. Brauchbare Maßstäbe zur Beurteilung der Homogenität hinsichtlich dieser Einflüsse geben die Kenndaten ihrer Verteilungen.

Wind

Mit großer Wahrscheinlichkeit ist Normalverteilung der Windgeschwindigkeit um den Durchschnitt gegeben. Gemessen wurde mit einem Staudruckanemometer. Es wurde der Geschwindigkeitsbereich abgeschätzt, der etwa während 50% der Beobachtungszeit eingehalten wurde. Jede Grenze dieses Bereichs kann daher etwa als Durchschnitt über je 50% der Beobachtungszeit aufgefaßt werden. Damit ist näherungsweise eine kollektive Behandlung möglich.

Durchschnitt 4,3 m · sec⁻¹
 Streuung 0,65 m · sec⁻¹
 Unsicherheit d. Durchschnitts . . 0,13 m · sec⁻¹

Den Umständen entsprechend kann die Windgeschwindigkeit als befriedigend gleichförmig bezeichnet werden.

Da später zwischen Kenterfällen und Nicht-Kenterfällen unterschieden werden soll, ist ein Vergleich der durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten bei diesen Merkmalen nötig.

Durchschnitt bei Kentern 4,3 m · sec⁻¹
 Durchschnitt bei Nicht-Kentern . . 4,1 m · sec⁻¹

Der Unterschied ist kaum größer als die Unsicherheit des Durchschnitts und mithin unbedeutend.

Windbahnlänge

Die Windbahnlänge wurde geschätzt. Die angegebenen Werte sind deshalb recht ungenau und können außerdem nur als durchschnittliche Werte für eine Meßfahrt gelten, weil das Modell zum Teil beachtliche Strecken zurücklegte. Die Annahme einer Normalverteilung erscheint deshalb gewagt, kann aber wohl in Ermangelung besserer Ansätze doch einigen Aufschluß geben.

Durchschnitt 1,7 km
 Streuung 0,57 km
 Unsicherheit d. Durchschnitts 0,11 km

Das Kollektiv kann mit der oben gemachten Einschränkung damit auch hinsichtlich dieser Größe als ausreichend homogen gelten.

Durchschnitt bei Kentern 1,65 km
 Durchschnitt bei Nicht-Kentern 1,7 km

Der Unterschied ist wesentlich kleiner als die Unsicherheit des Durchschnitts und mithin völlig belanglos.

Die eigentliche Kenterzeit T_K und die Zeit bis zum Kenterbeginn T_{nK} spielen bei der Ermittlung der Aussagensicherheit eine wesentliche Rolle. Auf einen besonderen Umstand, der sich aus der Versuchstechnik ergab, muß dabei besonders hingewiesen werden. Am Beginn jeder Meßfahrt war eine gewisse Systematik dadurch gegeben, daß das Modell während eines Intervalls möglichst kleiner Wellenamplituden freigegeben wurde. Dadurch kann der Durchschnitt für die Zeit bis zum Kenterbeginn zu groß ermittelt worden sein, weil ein überschaubarer Zeitraum von 5—10 sec für Kentern ausgeschieden wurde.

Kenterzeit

Unter Kenterzeit wird hier der Zeitraum T_{K_0} verstanden zwischen letztem 0-Durchgang des Modells und der 90°-Lage (Bild 2).

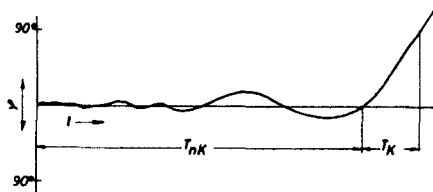


Bild 2

Es darf Normalverteilung vorausgesetzt werden. Dann ist:

- Durchschnitt 5 sec
- Streuung 1,3 sec
- Unsicherheit des Durchschnitts 0,4 sec

Da die Vorgeschichte des eigentlichen Kenterns großen Einfluß auf diesen Wert haben muß, kann die Streuung als erfreulich gering bezeichnet werden.

Zeit bis zum Kenterbeginn

Offensichtlich liegt keine Normalverteilung vor. Die Kenntnis der Streuung dieses Zeitintervalls ist aber zur Definition des Begriffs Nicht-Kentern unerlässlich.

Wegen der reinen Zufälligkeit der Phasenlage der einzelnen Komponenten eines natürlichen Seegangs kann gefolgert werden: Zu einem beliebigen Zeitpunkt besteht für jeden Punkt einer Geraden in Wellenrichtung die gleiche Wahrscheinlichkeit dafür, daß er mit dem Beginn einer Wellengruppe zusammenfällt, die ein Modell mit bestimmten Stabilitätseigenschaften zum Kentern bringen kann.

Diese Gerade entspricht dem Kurs eines fahrenden Modells, für das mithin in jedem Punkt dieser Geraden zu jedem beliebigen Zeitpunkt gleiche Wahrscheinlichkeit für Kenterbeginn gegeben ist.

Wird dieser Weg des Modells in ausreichend kleine Wegabschnitte Δx oder, was bei konstanter Geschwindigkeit gleichwertig ist, in Zeitabschnitt Δt unterteilt, besteht für jedes Δt die gleiche Grundwahrscheinlichkeit dafür, daß ein bestimmtes Modell zu kentern beginnt. Ist T_{nKD} die durchschnittliche Zeit, die bis zum Kentern vergeht, ist diese Wahrscheinlichkeit

$\frac{\Delta t}{T_{nKD}}$. Ist T_{nKD} aus einem Kollektiv von Kenterfällen bekannt, kann damit die Wahrscheinlichkeit für Kentern innerhalb beliebiger Zeiträume T ermittelt werden.

Mit $\frac{\Delta t}{T_{nKD}} = \frac{1}{b}$ ergeben sich für n -Bereiche mit $\Delta n = 1$ die Wahrscheinlichkeitsdichten

$$w_1 = \frac{1}{b}$$

$$w_2 = \frac{b-1}{b^2}$$

$$w_3 = \frac{(b-1)^2}{b^3}$$

⋮

⋮

$$w_n = \frac{(b-1)^{n-1}}{b^n} = \frac{1}{b} \left(1 - \frac{1}{b}\right)^{(n-1)}$$

Durch Grenzübergang erhält man:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{b} \left(1 - \frac{1}{b}\right)^{(n-1)} = \frac{1}{b} \left(1 - \frac{1}{b}\right)^t = \frac{1}{b} \cdot e^{-\frac{1}{b} \cdot t}$$

$\Delta n \rightarrow dt, n = t$
als Wahrscheinlichkeitsdichte für Kentern zur Zeit t mit $t_0 = 0$ bei Beginn der Meßfahrt.

Die Wahrscheinlichkeit für Kenterbeginn innerhalb der Zeit T ist dann

$$W_K(T) = \int_0^T w_K(t) dt$$

Angewandt auf das vorliegende Kollektiv erhält man:

Mittelwert $a = \int_0^{\infty} t w_K(t) dt = 47,2 \text{ sec}$

Streuung $s = \sqrt{\int_0^{\infty} (t-a)^2 w_K(t) dt} = 29,1 \text{ sec}$

Durchschnitt $T_{nKD} = 68,0 \text{ sec}$

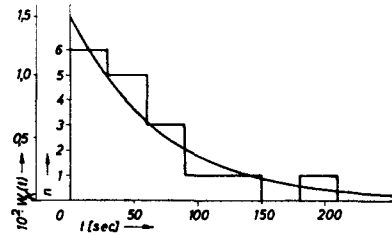


Bild 3

Bild 3 zeigt die gemessene und die theoretische Häufigkeit.

Nicht-Kentern

Der Begriff Nicht-Kentern darf in diesem Zusammenhang nur in Verbindung mit einem Zeitintervall gebraucht werden, für den Nicht-Kentern festgestellt wurde. Einerseits sollte dieses Zeitintervall recht lang gewählt werden, um mit möglichst großer Sicherheit von absolutem Nicht-Kentern sprechen zu können, andererseits erfordert eine statistische Auswertung eine möglichst große Anzahl von Einzelfällen. Es erscheint zweckmäßig, daß für Kentern und Nicht-Kentern etwa gleiche Aussagesicherheit angestrebt wird. In der Meßtechnik sieht man eine Aussage als ausreichend sicher an, wenn eine Wahrscheinlichkeit von 95 % für ihre Gültigkeit vorhanden ist. Bei Normalverteilung ist das der Bereich innerhalb der Grenzen $D \pm 2\sigma$.

Die gleiche Wahrscheinlichkeit soll auch hier gefordert werden.

Das Zeitintervall T_{nK} für Nicht-Kentern ist dann so zu bestimmen, daß innerhalb dieser Zeit 95 % aller Kenterfälle zu erwarten wären. Sind A alle Fälle $(x - a) < \xi_s$, dann gilt bei beliebigen Verteilungen die Streuungsgleichung

$$W_A \geq 1 - \frac{1}{\xi^2} = 0,95; \xi^2 = \frac{1}{0,05} = 20; \xi = 4,5$$

Damit ist

$$T_{nK} = a \pm \xi s = 47,2 + 4,5 \cdot 29,1 = 178 \text{ sec}$$

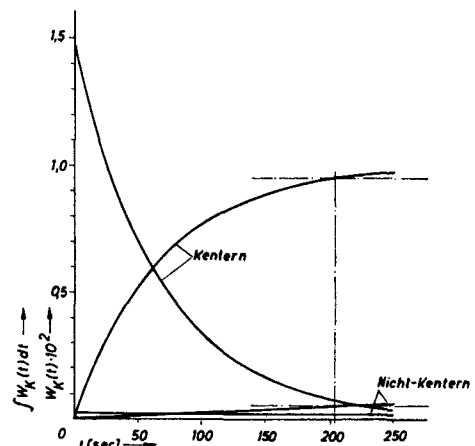


Bild 4

Der ermittelte, 95 % aller Kenterfälle einschließende Wert $T_{nK} \sim 180$ sec stimmt nicht ganz mit der durch den Durchschnitt $T_{nKD} = 68$ sec bestimmten Verteilungsfunktion überein. Hier ergibt sich $T_{nK} = 204$ sec. Das kann an der erwähnten Systematik zu Beginn der Meßfahrten liegen. Bei einem Durchschnitt $T_{nKD} = 60$ sec würde die theoretische Verteilungsfunktion bei 180 sec 95 % erreicht haben.

Damit ist ein Zeitintervall T_{nK} gefunden, daß im Rahmen dieser Arbeit Nicht-Kentern kennzeichnen soll.

In Bild 4 sind die Wahrscheinlichkeitsdichten $w_K(t)$ und die Verteilungsfunktionen $\int w_K(t)$ für Kentern der Kenter- und der Nicht-Kenterfälle einander gegenübergestellt, um die Unterschiede zu veranschaulichen.

Kenterwahrscheinlichkeit

Die Kenterwahrscheinlichkeiten 95 % und 5 % entsprechen bestimmten MG-Werten des Modells. Es soll versucht werden, den Verlauf der Verteilungsfunktion zwischen diesen Werten näherungsweise zu bestimmen.

Das Ergebnis soll zunächst für Fahrt gegen die Wellen gültig sein. In diesem Fall ist die Begegnungsfrequenz groß. Erst eine Folge von mehreren Wellen mit großer Amplitude kann das Modell zum Kentern bringen. Wegen der Trägheit des Modells kann jede Einzelwelle nur geringe Neigungsänderungen bewirken, mit guter Näherung kann eine über einige Perioden und alle Phasen gemittelte Stabilität als wirksam angesehen werden. Es würde nun einen viel zu großen Aufwand bedingen, im einzelnen für etliche Phasen über mehrere Perioden unterschiedlicher Amplitude die mittlere Stabilität zu ermitteln. Näherungsweise kann wie folgt vorgegangen werden: Man bestimmt zunächst nach Grim [1] die Funktion der wirksamen Amplitude η_{eff} , und dazu die Funktion $B_{eff}(t)$ der Einhüllenden (siehe Bartsch [2]), die damit jetzt die Funktion der jeweils wirkenden Steilheit einer Welle mit $\lambda_{eff} = L$ darstellt, deren wirksame Länge also gleich der Schiffslänge ist. Jetzt kann man, wie Grim für eine einzelne Welle die mittlere Amplitude ermittelt, die mittlere Steilheit $\frac{H_{eff \Delta t}}{\lambda_{eff}}$ für mehrere Wellen bestimmen, indem man einen Amplitudenmittelwert $H_{eff \Delta t}$ über ein Zeitintervall Δt bildet und erhält

$$H_{eff \Delta t}(t) = \int_{-\Delta t/2}^{+\Delta t/2} B_{eff}(t) dt.$$

Bild 5 zeigt eine derartige aus einer natürlichen Wellenregistrierung graphisch ermittelte Funktion $H_{eff \Delta t}$ über 252 sec mit $\Delta t = 3$ sec für einen feststehenden Punkt.

Für ein Modell, das mit bestimmter Geschwindigkeit gegen die Wellen fährt, gilt diese Funktion nicht ohne weiteres. Es soll versucht werden, sie wenigstens näherungsweise zu transformieren.

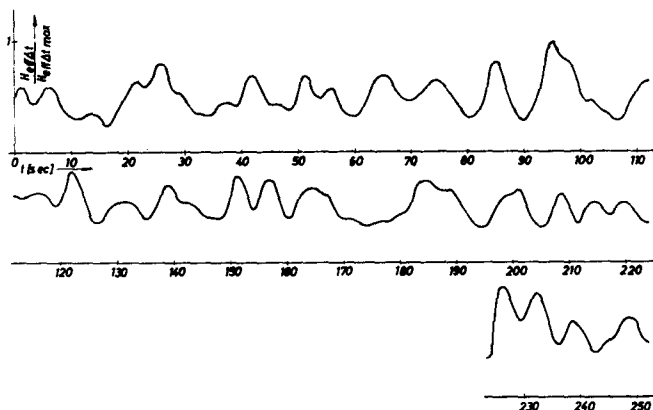


Bild 5

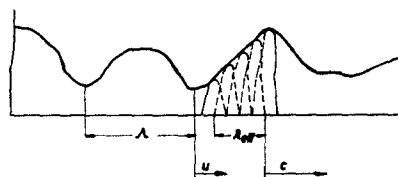


Bild 6

Man kann davon ausgehen, daß ein schmales Spektrum vorliegt, weil sonst überhaupt keine ausgeprägten Wellengruppen entstehen (siehe Bartsch [2] und Kastner [3]). Dann sind die hauptsächlichsten Frequenzen der Teilwellen wenig verschieden voneinander und die Geschwindigkeit der durch Interferenz entstehenden Wellengruppen ist etwa gleich der halben Geschwindigkeit der Einzelwellen [6]

$$u = \frac{c}{2}.$$

Definiert man entsprechend Bild 6 eine Gruppenlänge Λ zwischen zwei Amplitudenminima, so ist die Periode T (tau) bezogen auf einen festen Punkt

$$T = \frac{\Lambda}{u} = \frac{\Lambda}{c/2}$$

Bezogen auf einen in Wellenrichtung mit v sich bewegenden Punkt ist dann

$$T^* = \frac{\Lambda}{c/2 \pm v}$$

Um zu einem geometrisch ähnlichen Bild zu kommen, muß nun zwischen Δt bezogen auf einen festen Punkt und Δt^* bezogen auf einen fortschreitenden Punkt die Beziehung bestehen:

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta t^*}{T^*}$$

oder
$$\frac{\Delta t \cdot c/2}{\Lambda} = \frac{\Delta t^* (c/2 \pm v)}{\Lambda}$$

also
$$\Delta t^* = \Delta t \cdot \frac{c}{c \pm 2v} \text{ oder } \Delta t = \Delta t^* \frac{c \pm 2v}{c}$$

Im vorliegenden Fall ist

$$\Delta t^* = 3 \cdot \frac{1,8}{1,8 + 2,4} \sim 1,3 \text{ sec.}$$

Die in Bild 5 dargestellte Funktion ist damit, statistische Auswertung vorausgesetzt, mit entsprechend verändertem Zeitmaßstab einer Funktion gleichwertig, die aus einer Registrierung entstanden wäre, bei der der Meßpunkt mit der Geschwindigkeit v entgegen den Wellen bewegt, $\Delta t^* = \frac{\Delta t \cdot c}{c + 2v}$

gewählt und die Meßzeit auf $T^* = T \frac{c}{c + 2v}$ beschränkt wor-

den wäre. Damit können die für einen festen Punkt ermittelten Wellendaten auf das fahrende Modell angewandt werden. Bestimmt man die Häufigkeit der $H_{eff \Delta t}(t)$ ist die Wahrscheinlichkeitsdichte ermittelt, mit der Verteilungsfunktion kennt man die Wahrscheinlichkeit $W(\Lambda)$ für alle $H_{eff \Delta t}(t) \geq \Lambda$. Bedenkt man, daß zu jeder Steilheit, welche die Zeit Δt wirkt, für ein bestimmtes Modell ein MG_K -Wert gehören muß, bei dem gerade Kentern eintritt, ist mit $W(\Lambda)$ der Verlauf der Kenterwahrscheinlichkeitsfunktion $W_K(MG)$ bestimmbar.

Bild 7 zeigt Amplitudenhäufigkeit und deren Verteilungsfunktion für

a) $H_{eff \Delta t}(t) = B_{eff}(t); \Delta t \rightarrow dt$
einer Wellenregistrierung und darunter

b) $H_{eff \Delta t}(t) = \int_{-\Delta t/2}^{+\Delta t/2} B_{eff}(t) dt; \Delta t = 3 \text{ sec.}$

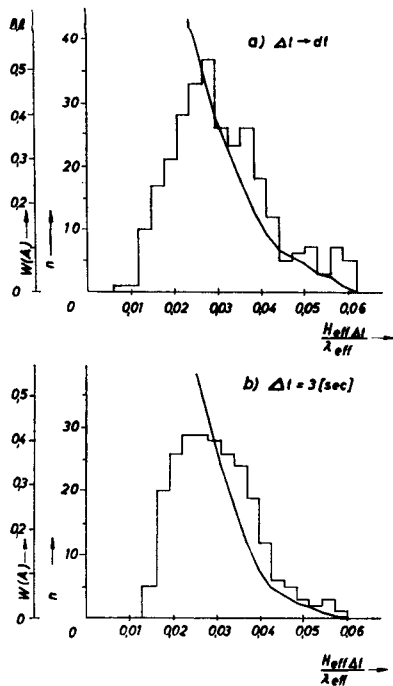


Bild 7

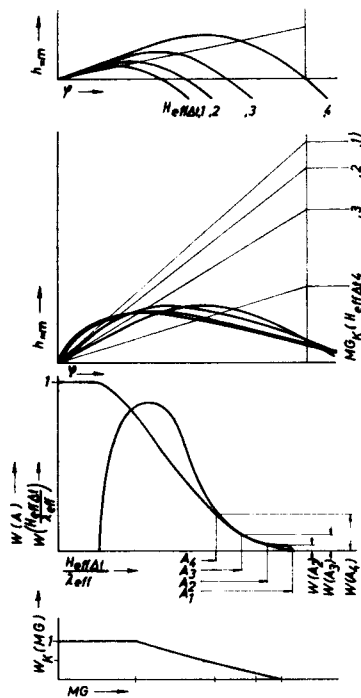


Bild 8

Es sei am Rande vermerkt, daß durch $H_{eff} \Delta t(t)$ Rollschwingungen angeregt werden können. Bild 5 läßt deutlich Periodizität erkennen. Die Begegnungsperiode T^* kann auch bei Fahrt gegen die Wellen leicht das $1/2$ - oder 1-fache der Eigenperiode des Modells betragen (siehe Grim [1] und [4]).

$$\frac{T^*}{T_\varphi} = 0,5; 1 \dots$$

Wird $W(A)$ entsprechend $MG_K \left(\frac{H_{eff} \Delta t}{\lambda_{eff}} \right)$ verzerrt, erhält man

nach entsprechender Normierung $W_K(MG)$. Bild 8 gibt eine grundsätzliche Erläuterung. Diese Funktion wird im allgemeinen durch eine Gerade ausreichend genau wiedergegeben, so daß es zugänglich erscheint, zwischen $W_K(MG_{nK})$ und

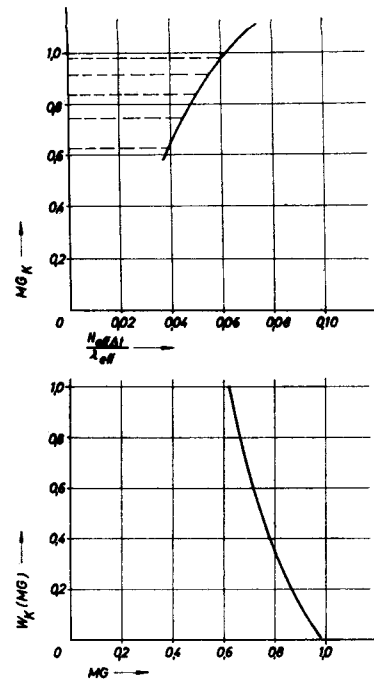


Bild 9

$W_K(MG_K)$ linear zu interpolieren und darüber hinaus zu extrapolieren. Bild 9 zeigt die Funktionen $MG_K \left(\frac{H_{eff} \Delta t}{\lambda_{eff}} \right)$ und $W_K(MG)$ für das Modell beim Freibord 4,4 cm.

Stabilitätsgrenzwerte

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß MG als kennzeichnender Parameter der Stabilität für ein bestimmtes Modell mit bestimmtem Freibord verwendet wird.

Jede Meßfahrt ist eine Alternative bezüglich Kentern und Nicht-Kentern. Es ist damit Bernoullische oder binomiale Verteilung gegeben.

Für die Wahrscheinlichkeit $W_n(x)$, daß bei n -maliger Wiederholung einer Alternative das Ereignis dessen Grundwahrscheinlichkeit q ist, x -mal eintritt, gilt

$$W_n(x) = \binom{n}{x} p^{n-x} \cdot q^x; \quad p = 1 - q.$$

Liegt ein bestimmtes Ergebnis vor, kann auch $W_n(x)$ festgesetzt und nach der Grundwahrscheinlichkeit q gefragt werden, die vorhanden sein muß. So wird hier verfahren.

Wiederum wird eine Restunsicherheit von 5% zugelassen. Dann muß die Frage lauten:

Bei welcher Grundwahrscheinlichkeit q wird $W_n(x) = 0,05$, wenn bei n Wiederholungen ein Ereignis x -mal eintritt?

Sucht man die wahrscheinliche Grundwahrscheinlichkeit, muß $W_n(x) = 0,5$ eingesetzt werden.

a) Nach Bild 1 ergeben sich 12 Fälle mit Kentern (Nr. 1-12) für ein MG von 0,65 cm und mit $T_{nK} = 180$ sec, ca. 12 Fälle von Nicht-Kentern (13-16) für ein MG von 0,96 cm.

Die Grundwahrscheinlichkeiten für $W_{n1}(x) = 0,05$ und $W_{n2}(x) = 0,5$ sind aus Bild 10a ersichtlich. Mit der Vereinfachung, das $W_K(MG)$ linear verläuft, bestimmt eine Gerade durch die beiden Punkte für $W_{n1}(x) = 0,05$ zwei extreme MG -Werte. Auf der Seite Nicht-Kentern ist bei dem entsprechenden MG schlimmstenfalls noch etwa in 5% aller Fälle Kentern zu befürchten, auf der Seite Kentern bestenfalls in 5% aller Fällen Nicht-Kentern. Der wahrscheinliche Verlauf von $W_K(MG)$ wird durch eine Gerade durch die beiden Punkte $W_{n2}(x) = 0,5$ dargestellt, im Bild die gestrichelte Linie.

Hebelarmkurven

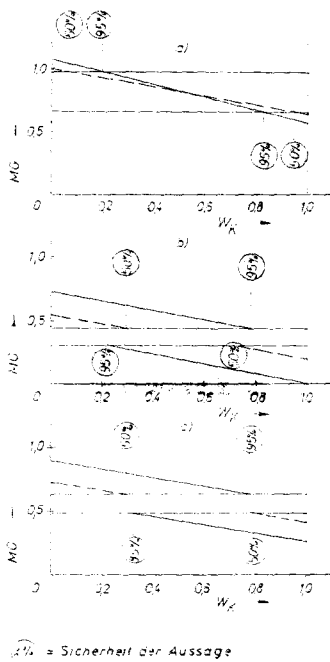


Bild 10

Es kann jetzt mit 95 % Sicherheit ausgesagt werden:

Zwischen $MG = 0,96$ und $1,06$ cm liegt der kleinste MG -Wert, bei dem kein Kentern bei entsprechendem Seegang auftritt. Zwischen $MG = 0,55$ und $0,65$ cm liegt der größte MG -Wert, bei dem immer Kentern auftritt.

b) Mit der Annahme, daß $W_K(MG)$ die gleiche Steigung hat, wie bei a), $W_n(x) = 0,5$, ergeben sich mit je zwei Fällen von Kentern und Nicht-Kentern nach Bild 10b die Bereiche:
 $MG = 0,44$ – $0,73$ cm für kleinstes MG für immer Nicht-Kentern
 $MG = 0,00$ – $0,30$ cm für größtes MG für immer Kentern.

c) Nach Bild 10c ergeben sich bei zwei Fällen Nicht-Kentern und drei Fällen Kentern die Bereiche:
 $MG = 0,63$ – $0,90$ cm für kleinstes MG für immer Nicht-Kentern
 $MG = 0,25$ – $0,49$ cm für größtes MG für immer Kentern.

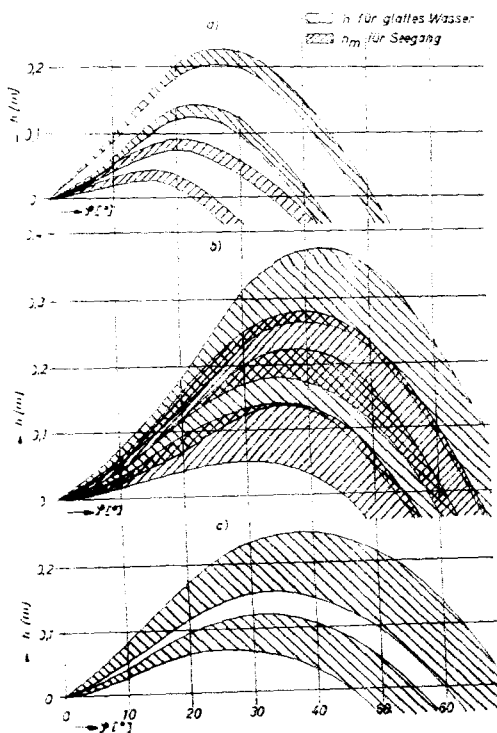


Bild 11

Bild 11a–c enthält die zu den MG -Bereichen gehörenden Hebelarm-Bereiche für glattes Wasser und soweit ausgerechnet, die Bereiche der mittleren Seegangshebelarme. Der Anschaulichkeit halber wurden die Werte auf ähnliche Schiffe mit $L = 100$ m umgerechnet. Die zugrundegelegten Wellenabmessungen sind $\lambda = 100$ m, $H = 6$ m.

Aus den Ergebnissen allgemeinere Schlüsse zu ziehen, ist verfrüht. Es müssen dazu noch weitere Messungen durchgeführt werden. Die Bereiche nach Bild 11b, also beim größeren Freibord ($3,2$ m für das 100 -m-Schiff) liegen recht hoch. Da die zutreffenden Werte aber durchaus die unteren Grenzen sein können, kann gesagt werden, daß die Ergebnisse durchaus mit der Erfahrung übereinstimmen.

Bei Fahrt mit den Wellen muß mit völlig anderem Verhalten des Modells gerechnet werden. Die wenigen Beobachtungen, die bisher gemacht wurden, reichen nicht aus, um auch nur näherungsweise Gesetzmäßigkeiten abzuleiten. Auf die statistische Auswertung muß deshalb vorläufig verzichtet werden.

Abschließend kann gesagt werden, daß mit der von Kastner beschriebenen Modell-Versuchstechnik ein brauchbares Verfahren gefunden zu sein scheint, einen Überblick über das Verhalten von Schiffen im natürlichen Seegang zu gewinnen. Dem Anschein nach wird eine enge Beziehung zu errechneten Seegangsstabilitätswerten, deren Abhängigkeit von etlichen Parametern Arndt [5] erläuterte, herzustellen sein. Die Versuche werden fortgesetzt.

(Vorgetragen am 27. Januar 1962)

Schrifttum

- [1] Grim, O.: Beitrag zum Problem der Sicherheit des Schiffes im Seegang. Schiff und Hafen, Juni 1961.
- [2] Bartsch, H.: Statistische Methoden zur Untersuchung eines Schiffes im Seegang. Schiffstechnik Band 6 (1959), Heft 30 und 31.
- [3] Kastner, S.: Kenterversuche mit einem Modell in natürlichem Seegang. Schiffstechnik Band 9 (1962), Heft 48.
- [4] Grim, O.: Rollschwingungen, Stabilität und Sicherheit im Seegang. Schiffstechnik Band 1 (1952), Heft 1.
- [5] Arndt, B.: Berechnungen des Seegangseinflusses auf ein Schiff. Schiffstechnik Band 9 (1962), Heft 48.
- [6] Lamb, H.: "Hydrodynamics" 6th ed. Cambridge University Press (1932).

Bezeichnungen

- a Mittelwert bei beliebiger Verteilung
- A Merkmalsbereich
- B(t) Funktion der Einhüllenden eines natürlichen Seegangs
- c Geschwindigkeit einer Einzelwelle
- D Durchschnitt (Gaußverteilung)
- eff als Index: für eine wirksame Welle, die gleich der Modell-Länge ist
- H Wellenhöhe
- K als Index: für Kentern
- L Modell-Länge
- MG Metazentrische Höhe
- m als Index: für gemittelter Wert
- n ganze Zahl, Anzahl
- nK als Index: für Nicht-Kentern
- p Grundwahrscheinlichkeit
- q Grundwahrscheinlichkeit
- s Streuung bei beliebiger Verteilung
- t veränderliche Zeit
- T Zeitabschnitt
- u Geschwindigkeit einer Wellengruppe
- v Modellgeschwindigkeit
- w Wahrscheinlichkeitsdichte
- W Wahrscheinlichkeit
- x Veränderliche
- Λ Länge einer Wellengruppe
- λ Länge einer Einzelwelle
- ξ Streuungskoeffizient bei beliebiger Verteilung
- σ Streuung (Gaußverteilung)
- T* Begegnungsperiode Wellengruppe-Modell
- T Periode einer Wellengruppe
- \approx als Index: für Seegang

Diskussion zu den Vorträgen Krappinger, Arndt, Kastner und Roden

O. Grim

Da sich für die Beschreibung des natürlichen Seeganges und der Bewegungen des Schiffes im natürlichen Seegang die statistische Methode als sehr geeignet erwiesen hat, erscheint es richtig, diese Methode auch auf das Problem der Sicherheit des Schiffes im natürlichen Seegang anzuwenden. Sie kann tatsächlich hierzu wertvolle Informationen liefern, wie in dem Vortrag von Herrn Dr. Krappinger gezeigt und erwähnt ist. Sie liefert u. a. Informationen über die Höhe, den Zeitraum, die Frequenz eines für die Stabilitätsbeanspruchung des Schiffes interessanten Zustandes. Alle diese Informationen haben den Charakter von Wahrscheinlichkeitsaussagen. So interessant und wichtig diese Aussagen auch sind, so erscheinen sie für das Problem der Sicherheit nicht ausreichend. Es erscheint nicht ganz ausreichend, als Aussage zu erhalten, daß das Schiff in 80 oder 90 % der denkbaren Fälle sicher ist. Es wäre notwendig, eine weitere Aussage zu erhalten, die wirklich den extremsten denkbaren Zustand erfaßt. Eine solche Aussage über den extremsten denkbaren Zustand kann die statistische Methode z. Z. nicht liefern; sie setzt eine lineare Superposition von harmonischen Komponenten voraus und liefert für die Maximalwerte ebenfalls nur Wahrscheinlichkeitsaussagen, für die es keine obere Grenze gibt. Es muß aber solche Grenzen geben, und zwar gibt es u. a. Grenzen, die gesetzt sind durch die Gültigkeit der linearen Superposition der harmonischen Komponenten. Es wäre eine dankbare Aufgabe, solche Grenzen aufzuspüren und in die Methode einzubauen. Ich bitte, das als Anregung und nicht als Kritik aufzufassen.

J. Jens:

Zum Vortrag von Herrn Kastner möchte ich fragen, ob Ähnlichkeit in der Massenverteilung zwischen dem Modell und einem entsprechenden naturgroßen Frachtschiff besteht.

Soweit auf den Bildern zu ersehen war, sind die Meß- und Antriebsapparate im Modell niedrig angeordnet. Dies kommt auch dadurch zum Ausdruck, daß zur Herstellung eines normalen statischen Stabilitätszustandes ein Gewicht an einem Mast angeordnet wurde. Es besteht damit der Eindruck, daß die Massenverteilung des Modelles mehr einem Segel- bzw. einem Feuerschiff und weniger einem Frachtschiff ähnelt. Der Trägheitsradius dieser Schiffe ist durch das Rigg bzw. durch den Feuerturm erheblich größer gegenüber den Frachtschiffen, und zwar beträgt der Schlingerbeiwert nach der Weiss'schen Formel $f = t/B \sqrt{MG}$ 0,95—1,05 und nur 0,70—0,80 für die Frachtschiffe.

Nun werden sowohl Segel- als auch Feuerschiffe mit größeren Hebelarm- und MG-Werten konstruiert, als das Modell im allgemeinen und im besonderen beim Kentern besaß. Da das dynamische Verhalten der Schiffe im Seegang nicht unwesentlich ist, wäre, falls die geäußerte Vermutung zutrifft, vorzuschlagen, die Versuche in dieser Hinsicht zu überprüfen.

H. Walden:

Herr Kastner hat an Darstellungen gezeigt, daß das Seegangsspektrum bei den Messungen auf dem Plöner See einer Gaußverteilung entsprach. Es sei erwähnt, daß Seegangsmessungen des Seewetteramts am Leuchtturm Mellum Plate Verteilungen erbrachten, bei denen die Übereinstimmung mit der Gauß-Funktion schlechter ist.

Zur Frage, ob das gefundene eindimensionale Seegangsspektrum die gleiche Form besitzt wie auf dem Meer, muß gesagt werden, daß unter den Seegangsforschern bisher noch keine Einigkeit über die Beschaffenheit des eindimen-

sionalen Spektrums erzielt wurde. Es besteht daher eine gute Aussicht, daß das hier benutzte Spektrum hinsichtlich der Form einem Spektrum im „großen Seegang“ entspricht.

Allerdings sollte man möglichst das zweidimensionale Spektrum bestimmen und benutzen; es sollte also auch in Betracht gezogen werden, daß die Laufrichtung der Einzelwellen von der mittleren Laufrichtung des Seegangs zum Teil abweicht. Das Richtungsspektrum wird insofern aufschlußreich sein, als Energie, die das Schiff schräg von der Seite trifft, eine besondere Bedeutung für die Kentervorgänge besitzen dürfte.

C. Boie:

1. Die Berechnung der Seegangshebelarmkurven ist mit einem erheblichen Arbeitsaufwand verbunden. Deshalb wird immer wieder die Frage aufgeworfen, ob es nicht möglich sei, auf Grund systematischer Rechnungen bei gegebenen Schiffs- und Wellendaten Aussagen über die Abweichung der Seegangshebelarmkurven von den für glattes Wasser berechneten Hebelarmen zu machen. Arndt weist in seinem Vortrag auf die Vielzahl der Parameter hin, die die Größe der Seegangshebelarme beeinflussen, und die deshalb einstweilen generelle Aussagen unmöglich machen. Als Ergänzung des hierzu im Vortrag gezeigten Bildes 11 sei nachstehend eine Zusammenstellung der aus Versuchen von Paulling [15] gefundenen Abweichungen des Mittelwertes der Seegangshebelarmkurve von der Glattwasserkurve gezeigt. Paulling hatte die Schiffform der bekannten „Serie 60“ zugrunde gelegt und das Verhältnis L/B, den Freibord und die Völligkeit variiert, die Wellenlänge mit $L/\lambda = 1$ und Wellenhöhe gleich $1/20\lambda$ konstant gelassen (Wir rechnen in Deutschland mit größeren Wellenhöhen, was für den ungünstigsten Fall mehrerer aufeinander folgender hoher Wellen nach den vorliegenden Seegangstatistiken notwendig ist). Obwohl also durch das Paulling'sche Versuchsmaterial noch keineswegs alle das Ergebnis beeinflussenden Parameter erfaßt sind, und obwohl außerdem die Genauigkeit der aufgetragenen Werte, die aus den im Druck veröffentlichten Diagrammen von Paulling herausgemessen wurden, keine allzu großen Ansprüche gestellt werden darf, läßt sich aus den durcheinander laufenden Kurven schon deutlich erkennen, daß sich die verschiedenen Parameter gegenseitig so stark beeinflussen, daß in der Tat generelle Aussagen über den Einfluß des Seegangs auf die Hebelarmkurve nach dem gegenwärtigen Stand unseres Wissens nicht möglich sind und man vorläufig gezwungen ist, jeden Fall einzeln zu untersuchen.

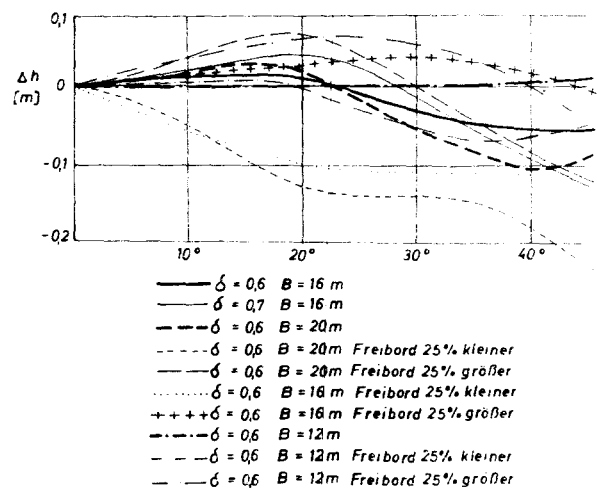


Tabelle 1

Kenterunfälle in den letzten zwölf Jahren (Zusammenstellung der in Betracht zu ziehenden Einflüsse)

Nr. Schiffsart	Seegang	Winddruck	krängende Momente aus:					Wasser an Deck
			freie Oberflächen in Tanks	Übergehen von Ladung	Fliehkraft im Drehkreis	Quer-anströmung		
1 Kümo	von achtern	ja	ja	nein	nein	nein	nein	
2 Kümo	von achtern	ja	nein	ja	nein	ja	nein	
3 Kümo mit Hilfsbesegelg.	von achtern	ja	nein	nein	nein	nein	nein	
4 Frachter	von achtern	ja	nein	unbekannt	nein	ja	nein	
5 Viermastbark	von achtern	ja	nein	ja	nein	ja	nein	
6 Kümo	glattes Wasser	nein	unbekannt	unbekannt	gering	nein	ja	
7 Viehdampfer	von vorn	ja	nein	ja	gering	nein	nein	
8 Kümo	von achtern	ja	nein	ja	nein	nein	nein	
9 Fischdampfer	von achtern	unbekannt	nein	nein	nein	ja	nein	
10 Kümo	von achtern	unbekannt	nein	nein	nein	nein	nein	
11 kleiner Frachter	schräg einkommend	ja	ja	unbekannt	gering	nein	nein	
12 Kümo	schräg einkommend	nein	nein	nein	nein	ja	nein	
13 Kümo	Fluß (glattes Wasser)	ja	nein	unbekannt	ja	ja	ja	
		ja	nein	nein	nein	ja	nein	
14 Große Fähre	von vorn	ja	ja	nein	nein	nein	nein	
15 Große Fähre	von achtern	unbekannt	nein	unbekannt	nein	ja	nein	
16 Fischerei-Schutzboot	von achtern	unbekannt	nein	nein	nein	ja	nein	

Anmerkung: Wind und Seegangsrichtung stimmten in vielen Fällen nicht überein (Dünung, Kreuzsee) und trafen in vielen Fällen mehr oder weniger schräg auf das Schiff. In den

Fällen 1, 3, 5, 12, 13, 14, 15 und 16 traten infolge der gleichzeitig wirkenden krängenden Momente so große Neigungen auf, daß Wasser durch Öffnungen in das Schiff eindringen konnte.

2. Es ist bei Erörterungen über die Frage, welche Konsequenzen man aus den bisherigen Erkenntnissen aus Versuchen und Rechnungen über die Stabilität im Seegang ziehen sollte, verschiedentlich die Frage aufgeworfen worden, ob wir die praktische Bedeutung unserer Ergebnisse nicht überschätzen. Ein häufig vorgebrachter Einwand lautete etwa, es sei kaum ein Fall bekannt, wo ein Schiff nur durch Seegangseinfluß gekentert sei. Diese Auffassung fußt noch auf den früher vorherrschenden Ansichten, die bei der Untersuchung von Kenterfällen sich dahingehend auswirkten, daß man von der Glattwasserhebelarmkurve ausging und nun nach einer Ursache suchte, die ein so großes krängendes Moment herbeigeführt haben könnte, daß das Schiff kenterte. Da man über den Einfluß des Seegangs auf die Hebelarmkurve zu dieser Zeit kaum etwas wußte und häufig auch nicht genügend nachgeforscht wurde, ob mehrere verschiedene krängende Momente zusammenwirkten, blieb in vielen Fällen die Erklärung für das Kentern unbefriedigend. In Tabelle 1 sind nun eine Reihe von Kenterfällen aus den letzten Jahren zusammengestellt, über die nähere Angaben vorliegen, und dabei die verschiedenen zum Zeitpunkt des Unfalls auf das Schiff wirkenden Einflüsse aufgeführt. Man sieht daraus zunächst, daß praktisch in allen Fällen mehrere Ursachen zusammentrafen, die das Kentern herbeiführten. Man sieht aber weiter daraus, daß bei einem sehr erheblichen Prozentsatz dieser Unfälle von vorn, achtern oder schräg einkommender Seegang herrschte, dessen Einfluß auf die im Unfallzeitpunkt wirksame Hebelarmkurve bei einer Untersuchung nicht vernachlässigt werden darf. Wir können uns glücklich schätzen, daß es mit den Modellversuchen, über die hier berichtet wurde, gelungen ist, die anderen krängenden Momente, die beim Kentern großer Schiffe zusammenwirken, auszuschalten und den Anteil, den der Einfluß des Seegangs auf die Hebelarmkurve hat, unbeeinträchtigt von den übrigen Faktoren zu untersuchen. Damit dürfte ein wesentlicher Schritt auf dem Wege getan sein, der dazu führen soll, daß rätselhaft gebliebene Kenterunfälle endgültig der Vergangenheit angehören sollten.

K. Wendel:

Ein Ziel der vier Vorträge von Dr. Krappinger, Arndt, Kastner und Roden ist, herauszufinden, bei welcher Stabilität ein Seeschiff in die Gefahr des Kenterns geraten kann. Es ist das ein altes Problem, eines derjenigen, mit denen die Schiffstheorie begonnen hat. Vor 200 Jahren begnügte

man sich mit der metazentrischen Höhe, später, vor etwa 100 Jahren, lernte man aus bösen Erfahrungen, daß diese als Kriterium der Stabilität nicht ausreicht, und allmählich führte sich die ganze Hebelarmkurve auch in die Entwurfspraxis ein.

Wenn damit auch ohne Zweifel die mechanisch richtige Größe für die Stabilitätsbeurteilung gefunden war, so stellte sich doch — wiederum auf Grund böser Erfahrungen — im Laufe der letzten Jahrzehnte heraus, daß die aufrichtenden, für glattes Wasser berechneten Hebel allein nicht genügen, um die Sicherheit gegen Kentern zu beurteilen.

Es ist erforderlich, auch den Verlauf der Hebel der krängenden Momente, die aus Winddruck, Drehmanöver, flüssigen Tankfüllungen und anderer Ladung, die zum Übergehen neigt, resultieren, zu studieren und erst die für Stabilität verbleibende Differenz kann als ein Maß für die Sicherheit gelten.

Neben dem Studium der Größe und des Verlaufs der Hebel dieser krängenden Momente zeigte sich nun aber auch, daß die Hebelarme für glattes Wasser nicht die rechte Basis sind für die Gegenüberstellung der aufrichtenden und der kippenden Momente. Die aufrichtenden Momente müssen vielmehr für einen ungünstigeren Fall bestimmt werden, und es zeigte sich, daß es dafür nötig ist — jedenfalls für alle Schiffe, die auf ihren Fahrten Seegang antreffen — die Hebel auch für den Verdrängungskörper zu bestimmen, der von einer wellenförmigen bewegten Wasseroberfläche begrenzt wird. Es ergeben sich so mannigfache Probleme, z. B.: Welche Bedeutung hat der ungünstigste Fall, der meist auftritt, wenn die Schiffsmittlinie sich auf einem Wellenberg befindet, für die Sicherheit? — Ob und welche Bedeutung kommt den mittleren Hebeln zu, die sich ergeben, wenn man von der Vorstellung einer am Schiff entlangstreichenden Welle ausgeht?

Wie auch bei anderen Fragen der Schiffstheorie ist hier eine befriedigende Lösung nur durch Theorie und Versuch möglich. Beide Wege zur Erkenntnis werden in den vier Vorträgen begangen. Die letzten und der Film zeigen Versuche, Kenterversuche mit großen Schiffen sind unausführbar, deshalb gehen wir — einem Vorschlag Rodens folgend — mit drahtlos gesteuerten Modellen auf „Modellgewässer“, wie meine Mitarbeiter die holsteinischen Seen getauft haben. Dort finden wir für Schiffsmodelle Seegang und

Wind entsprechend den Verhältnissen, die das große Schiff auf See antrifft. Ziel der Versuche und der parallel dazu entwickelten Theorie ist es, zuverlässige und für die Praxis brauchbare Mindeststabilitätswerte für Schiffe aller Art zu ermitteln, um sie sicher gegen Kentern zu machen. Diese Ergebnisse sollen auch kausal befriedigend fundiert werden, reicht, auch für Fälle, für die die Wahrscheinlichkeit überaus gering ist, ist nicht das Ziel unserer Arbeiten. Das führt immer zu unpraktischen Forderungen an den Entwurfsingenieur. Ich möchte so sagen: Wir wollen die Mindestwerte ermitteln, die einzuhalten sind, damit ein Schiff schweren Stürmen und hohen ungünstigen Seegängen standzuhalten vermag. Eine geringe zwar, jedoch eine nicht zu geringe Wahrscheinlichkeit ist dabei zugrunde zu legen; es ist also nicht von einem ganz seltenen ungünstigen Einzelfall auszugehen, sondern ein ungünstiger Fall, der für nahezu alle Schiffe, die auf einer bestimmten Route verkehren, im Verlaufe ihrer Lebensdauer einmal eintreten wird.

O. Krappinger (Schlußwort):

Ich bin Herrn Dr. Grim sehr dankbar, daß er die wichtige Frage nach statistischen Aussagen über extrem hohe Wellen so klar herausgestellt hat. Herr Dr. Grim ergänzt damit meinen Hinweis, daß immer dann, wenn $\eta_k/\sqrt{m_0}$ sehr groß wird, die Unsicherheit, d. h. die Wahrscheinlichkeit für Kentern überbewertet wird. Ich hatte dabei im Auge, daß bei geringem Energieinhalt des Seegangs in Wirklichkeit auch nicht sehr selten — wie es die Theorie ergibt — sehr hohe Wellen auftreten. Herr Dr. Grim weist nun ganz richtig darauf hin, daß auch bei großem Energieinhalt des Seegangs keine beliebig hohen Wellen auftreten.

Ich möchte in diesem Zusammenhang noch erwähnen, daß man es bei der Beurteilung der Kentersicherheit mit zwei ganz verschiedenen Aufgaben zu tun haben kann:

1. Welche Eigenschaften muß ein Schiff haben, damit es auch bei ungünstigstem Seegang nicht kentert.

Von dieser Aufgabenstellung geht offenbar Herr Dr. Grim aus. Dabei ist es ganz richtig, daß die Aussage, ein Schiff sei in 80 oder 90 % der Fälle sicher, nicht befriedigt.

2. Zahlreiche Küstenmotorschiffe fahren sehr oft mit einer Hebelarmkurve, die zwar für verhältnismäßig gutes Wetter ausreicht, nicht aber für schweren Sturm. Ihre Sicherheit ist also gleich groß, wie die Sicherheit, mit der man das Wetter für die Zeit, die es keinen Schutz unter Land finden kann, vorhersagen kann. Alle diese Schiffe haben in schweren Stürmen eine Wahrscheinlichkeit für Nichtkentern, die recht weit von 1 entfernt sein dürfte. Zur Beurteilung eines solchen Zustandes scheint mir die Wahrscheinlichkeit für Nichtkentern ganz brauchbar zu sein. Die Verhältnisse liegen hier ähnlich wie bei der Wahrscheinlichkeit für das Überstehen von Verletzungen. Auch hier gibt man sich bei manchen Schiffen mit kleinen Werten zufrieden.

S. Kastner (Schlußwort):

Es ist beim Bau des Modells Wert darauf gelegt worden, alle Einbauten möglichst hoch zu legen, um den Gewichtschwerpunkt nach oben zu bekommen. Deshalb wurden z. B. die Batterien auf leichten Styroporschaum gestellt. Nach oben begrenzt wurde dies Bestreben durch das wasserdichte Deck und die erwünschte Möglichkeit, mit und auch ohne Aufbauten fahren zu können, so daß die Aufbauten als Raum für die Meßgeräte nicht in Frage kamen. Durch das Gewicht am Mast sollte nun eine einfache Möglichkeit zur Verschiebung des Gesamtschwerpunktes der Höhe nach geschaffen werden. Leider ist damit auch jeweils eine Änderung des Trägheitsradius verbunden, die, solange sie in den üblichen Grenzen wie bei naturgroßen Schiffen bleibt, erträglich ist. Dies ist auch für

das verwendete Schiffsmodell für die unteren Stellungen des Gewichts am Mast der Fall. Für die oberen Stellungen tritt das ein, was Herr Jens befürchtet: Der Trägheitsradius i oder der entsprechende sog. Schlingerbeiwert nach Weiß nimmt höhere Werte an als bei Frachtschiffen üblich.

Daß dem Experiment vorbehalten blieb, bei welcher Stellung der Trägheitsradius hätte ein größeres Verschiebengewicht als das verwendete besessen, was jedoch wegen der begrenzten Tragfähigkeit des Modells nicht statthaft war. Während der ersten Versuchsreihe sofort die gesamte Anordnung zu ändern, wäre zu aufwendig gewesen. Die hierbei gemachten Erfahrungen werden für weitere Versuche jedoch verwertet, um vor allem im Kenterbereich dynamische Ähnlichkeit zu erhalten. Ich danke Herrn Jens für seinen Hinweis.

Zum Hinweis von Herrn Dr. Walden möchte ich sagen, daß die Übereinstimmung der in Plön gemessenen Verteilungsfunktion mit einer Gaußverteilung allerdings nur im Mittelbereich gut ist. An den Enden ist eine deutliche Abweichung der Meßpunkte von der Gaußgeraden zu erkennen. Gerade die Endbereiche enthalten jedoch die geringsten Prozentsätze der Dichtefunktion, d. h. die in den Wellen dieser Frequenz enthaltene Energie ist prozentual sehr gering. Um den Vergleich der Meßwerte mit der Gaußverteilung zahlenmäßig zu erfassen, wurde der sog. χ^2 -Test durchgeführt. Es ergibt sich für den Bereich von der Ordnungszahl 40 entsprechend 0,5 Hz bis zur Ordnungszahl 110 entsprechend 1,38 Hz eine statistisch gesicherte Übereinstimmung der gemessenen Seegangenergie im Mittelbereich mit der Gaußverteilung. Zieht man die Außenbereiche mit zur Betrachtung heran, so ist keine Übereinstimmung mehr vorhanden. Die beiden Außenbereiche enthalten jedoch zusammen nur 3,3 % der gesamten Seegangenergie, wovon wiederum 3 % auf den kurzwelligen und 0,3 % auf den langwelligen Bereich entfallen. Man kann deshalb diese Bereiche vernachlässigen und für den wesentlichen mittleren Bereich mit 96,7 % Anteil an der Seegangenergie feststellen, daß er einer Normalverteilung entspricht.

Die Bestimmung des sog. zweidimensionalen Spektrums $S(\omega, \beta)$, wo β die Laufrichtung der Wellen ist, erfordert einen wesentlich höheren meßtechnischen Aufwand. Daher wurde bei diesen ersten Untersuchungen das eindimensionale Spektrum gemessen, und es scheint auch vorerst sinnvoll zu sein, weiter mit dieser Meßmethodik zu arbeiten und sie so zu verbessern, daß am Meßort sofort nach der Messung das Spektrum vorliegt. Damit ist bereits während der Kenterversuche ein quantitatives Bild der Modellsee gegeben. Daß unter den Seegangsforschern noch keine Einigkeit über das nur eindimensionale Spektrum besteht, zeigt einmal die Schwierigkeit dieses Meßproblems, zum anderen sei ein Schiffbauer entschuldigt, der dies Problem als Randaufgabe bei dem Kenterverhalten von Schiffen ansah und nun erst merkte, in welches Neuland er sich begeben hat. Es ist zu hoffen, daß schon bald eindeutige quantitative Aussagen über natürlichen Seegang gemacht werden können, zumal an vielen Stellen daran gearbeitet wird.

B. Arndt (Schlußwort):

Mit den aus den Versuchen von Paulling abgeleiteten Kurven unterstreicht Herr Boie die Ansicht, daß die bisher vorliegenden Ergebnisse für einen allgemeinen Überblick noch nicht ausreichen, so daß man zunächst noch jeden Einzelfall untersuchen oder die systematischen Versuche weiterführen muß. Auf die Bedeutung dieser Arbeiten für die Sicherheit der Schiffe wird durch die Tabelle der Kenterfälle der letzten Jahre hingewiesen, aus der hervorgeht, daß der Seegang in vielen Fällen einen wesentlichen Teil zu der Katastrophe beigetragen haben kann, wenn dies bei den Seeamtsverhandlungen auch nicht immer erkannt worden ist.