Abteilung II — Seeschiffahrt

Thema 2

Studium der Bewegungen der Seeschiffe unter dem Einfluß der Wellen, des Windes und der Strömungen zur Bestimmung der Mindesttiefe in den Zufahrten zu den Seehäfen und an den Löschbrücken für Tanker und Erzfrachter an offener Küste

Von Dipl.-Ing. Sigesmund Kastner, Universität Hamburg; Dipl.-Ing. Siegmund Roden, Oberingenieur, Technische Hochschule Hannover; Dr.-Ing. Kurt Wendel, Professor, Technische Hochschule Hannover.

Thema des Berichtes:

Studium der Bewegungen der Seeschiffe unter dem Einfluß von Seegang und Wind in einem natürlichen Modellsystem zur Bestimmung der Mindesttiefe an Löschbrücken.

Zusammenfassung

Es ist allgemein üblich, zur Dimensionierung technischer Bauwerke Statistiken der Ursachen von Beanspruchungen heranzuziehen. Diese, zumeist Naturkräfte, unterliegen unwandelbaren Gesetzen und sind beobachtet und registriert worden. Sinnvoll können sie allerdings nur dann verwendet werden, wenn es gelingt, aus ihnen im voraus Statistiken der Wirkungen zu ermitteln. Wenn einfache, übersehbare Zusammenhänge bestehen, ist das auf theoretischem Wege möglich; dagegen nicht, wenn aus den Ursachen verwickelte komplexe Bewegungsvorgänge folgen wie z. B. die Bewegungen eines Schiffes im Seegang. In solchen Fällen sind auf Beobachtungen gegründete Statistiken der Wirkungen notwendig, wenn ein guter Kompromiß zwischen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit gefunden werden soll. Bei langsamer stetiger Entwicklung lassen sich solche durch ständige Beobachtungen an ausgeführten Bauwerken zusammentragen und auf neu zu erstellende anwenden; ohne Zweifel sind die meisten Sicherheitsvorschriften so entstanden.

Bei schneller, sprunghafter Entwicklung oder wenn völlig neuartige Konzeptionen verwirklicht werden sollen, scheidet dieser Weg aus; eine Statistik der Wirkungen fehlt oder was das gleiche ist, Erfahrungen fehlen und Mißerfolge sind möglich. Der vorliegende Bericht beschreibt, wie unter Ausnutzung natürlicher Gegebenheiten für Schiffsbewegungen zuverlässige übertragbare statistische Daten im Modellmaßstab ermittelt werden können. Von besonderem Vorteil ist dabei einmal, daß Vorgänge am Modell geradezu herbeigeführt werden können, die im Großen vermieden werden müssen und zum anderen, daß durch extreme „Seegangsbedingungen" für das Modell und eine maßstabsbedingte Zeitraffung in relativ kurzer Zeit eine große Menge von Informationen erhalten werden kann. Die Modellmethode wird am Beispiel der Kentersicherheit für Schiffe im Seegang erläutert und kann ebenfalls bei der Ermittlung notwendiger Mindesttiefen an Löschbrücken wertvolle Dienste leisten. Das Ergebnis sind Sicherheits- bzw. Risikograde, die in Verbindung mit Wirtschaftlichkeitsüberlegungen eine zweckmäßige Dimensionierung ermöglichen.

Inhalt Seite

1. Aufgabe 172
2. Ähnlichkeit eines natürlichen Modells 173
2.1 Wind und Seegang 174
2.2 Schiffe und andere Bauwerke 176
3. Kontrolle des Modellbereichs 176
3.1 Seegang 177
3.2 Wind 178
3.3 Schiff 178
4. Experimentelle Ermittlung von statistischen Daten 179
4.1 Durchgeführte Messungen zur Stabilität von Schiffen im Seegang 180
4.2 Mindesttiefe an Löschbrücken 182
5. Schlußwort 182

1. Aufgabe

Die Dimensionierung von technischen Bauwerken, die dem Einfluß von Naturkräften, wie Wind, Seegang, Strömung usw. ausgesetzt sind, ist immer problematisch, weil exakte Belastungsgrenzen nicht existieren. Absolute Betriebssicherheit oder auch nur Sicherheit gegen alle im Einklang mit physikalisch-technischen Erkenntnissen denkbaren Beeinflussungen ist mithin nicht erreichbar. Diese axiomatische Erkenntnis ist implizit in allen Sicherheitsvorschriften enthalten. Wenn z. B. über normale Belastungen einer technischen Einrichtung hinaus Sicherheitszuschläge bei der Konstruktion berücksichtigt werden müssen, bedeutet das nichts anderes als daß damit dem zufälligen Zusammentreffen einer Reihe besonders ungünstiger Umstände Rechnung getragen werden soll. Die Größe der Zuschläge und damit das Maß der ertragbaren Zufallsbelastungen ist eine reine Ermessensfrage. Man sagt daher auch folgerichtig, daß nach „menschlichem Ermessen" nichts mehr passieren kann, wenn derartige Sicherheitsvorschriften beachtet werden und verweist einen verbleibenden Risikorest in den Bereich höherer Gewalt. Vom wissenschaftlichen Standpunkt aus betrachtet ist diese Auffassung unbefriedigend; die tatsächlichen Zusammenhänge sollten vielmehr klar zum Ausdruck gebracht werden, beispielsweise durch Angabe eines Sicherheitsgrades, der identisch mit der Wahrscheinlichkeit für sichere Funktion ist, oder eines Risiko- oder Gefährdungsgrades, der identisch mit der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten gefährlicher Belastungsspitzen ist. Diese Auffassung wurde zuerst von Wendel in einigen Arbeiten über die Sicherheit von Schiffen für das Überstehen von Verletzungen vertreten und dann auch für die Behandlung von anderen Sicherheitsproblemen am Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffstheorie der Technischen Hochschule Hannover übernommen.

Bei dieser Methode ist immer die Kenntnis von Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit der Belastungen und deren Verteilung Voraussetzung. Leider sind theoretische Ansätze zur Bestimmung von Verteilungsfunktionen nahe den Grenzen oft recht unzuverlässig und statistisches Material, das bei ausreichendem Umfang hier zutreffendere Aussagen liefert, ist besonders dann, wenn neuartige technische Konzeptionen verwirklicht werden sollen, im allgemeinen nicht greifbar. Da Messungen zur Sammlung statistischer Daten

an Versuchsbauten in natürlichem Maßstab zumeist aus Kostengründen ausscheiden, liegt es nahe, solche im Modellmaßstab durchzuführen.

Am genannten Institut wurde diese Methode in den letzten Jahren erfolgreich benutzt, um Risikograde für das Kentern von Schiffen im Seegang zu bestimmen bzw. die zu vernünftigen Sicherheitsgraden gehörenden Mindeststabilitätswerte zu ermitteln. Die hier mitgeteilten Erfahrungen und Erkenntnisse entstammen diesen Messungen, sind aber darüber hinaus auch für ähnliche Problemstellung gültig, wie z. B. für die Ermittlung von Mindesttiefen an Löschbrücken oder künstlichen Löschinseln. Es wurden für den Modellfall naturgegebene Verhältnisse ausgenutzt, wie sie auf Binnenseen bei geeigneten Windverhältnissen anzutreffen sind.

2. Ähnlichkeit eines natürlichen Modells

Die Absicht, komplexe Bereiche, wie hier Wind — Gewässer — künstliche Inseln — Schiff, im Modellmaßstab nachzubilden, löst zunächst die Frage nach den innerhalb des Bereiches gültigen Modellgesetzen aus. Ohne Zweifel bestimmen hauptsächlich Schwerewellen die Bewegungsvorgänge an der Wasseroberfläche, ihre Dynamik bestimmt mithin die Ähnlichkeitsbedingungen, die erfüllt sein müssen, damit ein brauchbares Modell vorliegt. Wählt man als kennzeichnende Größen die Wellenlängen (bei Großausführung λ, bei Modell λ'), so ergeben sich die Ähnlichkeitsbedingungen nach Froude für alle

Längen $$\frac{a}{a'} = \frac{b}{b'} = \cdots\cdots = \frac{\lambda}{\lambda'} \qquad (1)$$

Geschwindigkeiten $$\frac{v}{v'} = \frac{w}{w'} = \cdots\cdots = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{1/2} \qquad (2)$$

Winkel $$\frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{\beta}{\beta'} = \cdots\cdots = 1 \qquad (3)$$

Winkelgeschwindigkeiten $$\frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{\beta}{\beta'} = \cdots\cdots = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{-1/2} \qquad (4)$$

Bekanntlich ist es nicht möglich, diesen Forderungen in allen Details des Modells streng zu genügen. Überall dort, wo die Reibung eine Rolle spielt, sind deren physikalische Gesetzmäßigkeiten zu beachten. Es ist daher eine Analyse der erreichbaren Modellähnlichkeit notwendig.

Wind und Seegang und als deren Folge Schiffsbewegungen sind stochastische Vorgänge. Ihre Betrachtung als Raum — oder Zeitfunktion ist daher nicht nur umständlich, sondern auch für manche Zwecke unergiebig, weil dafür nicht eigentlich einzelne Phasen des Bewegungsablaufs kennzeichnend sind, sondern statistische Maßzahlen bzw. Verteilungen. Mit Sicherheit kann angenommen werden, daß die Überlagerung verschiedener Bewegungen unabhängig vom Maßstab nach gleichen Superpositionsgesetzen erfolgt, solange die gleichen physikalischen Gesetze gegeben sind. Das ist hier der Fall, wenn der Modellmaßstab so gewählt wird, daß Kapillarwellen ohne nennenswerten Einfluß sind. Im gesamten Schwerewellenbereich wird also die Überlagerung nach einem einheitlichen Gesetz erfolgen. Damit werden auch ähnliche Abweichungen von linearen theoretischen Ansätzen im Modellbereich und im Großbereich zu erwarten sein. Dann aber genügt der Nachweis der Ähnlichkeit eben der statistischen Kenngrößen für die Festlegung ähnlichen Verhaltens.

2.1 Wind und Seegang

Es ist üblich und zweckmäßig, den Seegang durch sein Leistungsspektrum zu kennzeichnen. Ähnlichkeit entsprechend den Gleichungen (1) ... (4) besteht dann, wenn zwischen maritimem Spektrum und Modellspektrum die Beziehungen

$$\frac{r(\omega)}{r'(\omega')} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{2,5} \tag{5}$$

$$\frac{\omega}{\omega'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{-1/2}, \quad \frac{d\omega}{d\omega'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{-1/2} \tag{6}$$

bestehen.

Natürlicher Seegang wird durch Wind erzeugt. Den Zusammenhang Wind-Seegang beschreiben Roll und Fischer mit der Spektralgleichung

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} dR = C \cdot w^4 \left[1 + \left\{ 1 + \frac{2g^2}{w^2\omega^2} \right\} \left\{ -\exp\left(-\frac{2g^2}{w^2\omega^2} \right) \right\} \right]_{\omega_1}^{\omega_2} \tag{7}$$

Die Gesamtleistung des Spektrums ist danach

$$R = C \cdot w^4 \tag{8}$$

Fordert man nun für ähnlichen Seegang gemäß (5) und (6) für das Verhältnis der Gesamtleistungen

$$\frac{R}{R'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^2, \tag{9}$$

so muß nach (8) das Verhältnis der erzeugenden Windgeschwindigkeiten

$$\frac{w}{w'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{1/2} \quad \text{sein.} \tag{10}$$

Integriert man nur über Bereiche von dR, indem man die Grenzen in (7) entsprechend der Bedingung (4) $\frac{\omega}{\omega'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{-1/2}$ transformiert, so erhält man auch bereichsweise das gleiche Ergebnis. Das heißt aber, daß der Modellseegang dem maritimen Seegang im Gültigkeitsbereich obiger Spektralgleichung entsprechend (5) und (6) ähnlich ist, wenn für den Wind die Ähnlichkeitsbedingung (10) erfüllt ist.

Wie immer der Bewegungsmechanismus innerhalb eines Luftraumes im einzelnen sein mag, kann es doch als erwiesen gelten, daß die an einem Punkt meßbaren Windgeschwindigkeiten und -richtungen etwa normal verteilt sind. Mittelwerte und Streuungen sind von den meteorologischen Bedingungen abhängig. Das jeweilige Verhältnis Mittelwert zu Streuung liegt aber für eine große Intensitätsspanne etwa im gleichen Bereich. Damit ist es möglich, für Wind im Großbereich einen natürlichen Modellwind zu finden, welcher hinsichtlich Mittelwert und Streuung den Ähnlichkeitsbedingungen entspricht. Es gelten dann die Beziehungen

$$\frac{w_m}{w'_m} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{1/2} \tag{11}$$

$$\frac{s^2(w)}{s'^2(w')} = \frac{\lambda}{\lambda'} \tag{12}$$

Eine entscheidende Einflußgröße bei der Erzeugung von Windsee ist die Länge der Windbahn, über die der Wind ungehindert auf die Wasseroberfläche wirken kann (fetch). Nach der Bedingung (1) für die Längen sollen sich die Windbahnlängen verhalten wie

$$\frac{F}{F'} = \frac{\lambda}{\lambda'} \tag{13}$$

Es bleibt nachzuweisen, daß über entsprechende Strecken ähnliche Energiemengen vom Wind auf den Seegang übertragen werden.

Geht man von der wohl in erster Linie zutreffenden Vorstellung aus, daß die Energieübertragung durch Ausbildung dynamischer Druckpotentiale erfolgt, ist die zugeführte Energie proportional

$$E\,(T) \sim (w-c)^2 \cdot \lambda \cdot \frac{T}{2}^{\,2} . \tag{14}$$

Wegen der Forderung

$$\frac{E\,(T)}{E\,(T')} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^3 \tag{15}$$

muß sich mithin verhalten

$$\frac{T}{T'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{1/2} . \tag{16}$$

Die Beziehung

$$\frac{F}{F'} = \frac{T \cdot c}{T' \cdot c'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{1/2} = \frac{\lambda}{\lambda'} \tag{17}$$

stellt dann das Verhältnis der von ähnlichen Wellen nach ähnlicher Energiezufuhr durchlaufenen Strecken dar, also der ähnlichen „fetches".

Zweifellos spielen auch Reibungseinflüsse bei der Energieübertragung eine Rolle, und es muß mit Abweichungen von den hier skizzierten idealen Ähnlichkeitsbeziehungen gerechnet werden. Nach bisher durchgeführten Messungen scheinen diese jedoch unerheblich zu sein. Dieser Ähnlichkeitsnachweis gilt für tiefes Wasser, also etwa für $Z > \lambda$. Er läßt sich jedoch auch auf Flachwasser ausdehnen.

Unter der Voraussetzung, daß die Dichte der Luft ρ_L vernachlässigbar klein gegenüber der Dichte des Wassers ρ_W ist und daß Kapillarwellen keinen Einfluß haben, gilt für Schwerewellen allgemein der Zusammenhang

$$c^2 = \frac{g \cdot \lambda}{2\pi} \cdot \tan h \left(2\pi \cdot \frac{Z}{\lambda}\right) \tag{18}$$

Daraus ist für $Z > \lambda$ unschwer die bei (17) verwendete Ähnlichkeitsbeziehung für die Wellengeschwindigkeit c abzulesen.

Diese Beziehung bleibt auch bei flachen Gewässern, also $Z < \lambda$ gültig, wenn man dafür sorgt, daß das Verhältnis Wassertiefe zu Wellenlänge gleich bleibt, also wenn

$$\frac{Z}{\lambda} = \frac{Z'}{\lambda'} \quad \text{ist.} \tag{19}$$

Aus der Tatsache, daß das Verhältnis $\frac{c}{c'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{1/2}$ erhalten bleibt, darf geschlossen werden, daß die Deformationen der Spektren infolge veränderter Wellengeschwindigkeiten in flachem Wasser ähnlich sind.

2.2 Schiffe und andere Bauwerke

In erster Näherung werden die Bedingungen (1), (3) und (4) von einem Schiffsmodell erfüllt, wenn neben der äußeren Form auch die resultierenden Schwerpunktslagen und Trägheitsradien im Verhältnis $\frac{\lambda}{\lambda'}$ nachgebildet werden. Es verhalten sich dann ebenso die reduzierten Pendellängen wie $\frac{\lambda}{\lambda'}$ und damit die Winkelgeschwindigkeiten bzw. Frequenzen wie $\left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{-1/2}$; abweichende Ähnlichkeitsbedingungen hinsichtlich der Reibungseinflüsse lassen sich im allgemeinen durch Abwandlung der Dämpfungsmittel bzw. Aufbauten ausgleichen. Entscheidend ist, daß sich die entsprechenden Bewegungsgleichungen (Momentengleichungen) gliedweise zueinander ähnlich verhalten, also bei einem allgemeinen Ansatz

$$f(\ddot{\varphi}) + d(\dot{\varphi}) + h(\varphi) + k(w) = 0 \tag{20}$$

muß angestrebt werden:

$$\frac{f}{f'} = \frac{d}{d'} = \frac{h}{h'} = \frac{k}{k'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^4 \tag{21}$$

Durch experimentelle Nachprüfung und entsprechende Korrekturen läßt sich diese Bedingung mit guter Näherung erreichen.

Der Bedingung (2) kann durch entsprechende Auslegung des Antriebs entsprochen werden. Natürlich müssen darüber hinaus auch Bewegungen am Modell, die ihrerseits Modellbewegungen hervorrufen, der Bedingung (4) entsprechen. Hier ist z. B. an das Ruderlegen des Schiffes oder Schiffsmodells gedacht. Für andere Modellbauten gilt sinngemäß das für Schiffsmodelle Gesagte.

3. Kontrolle des Modellbereichs

Die Ausnutzung natürlicher Gegebenheiten für Modellversuche bedeutet, daß die einzelnen Einflußgrößen nicht jederzeit produzierbar sind, wie z. B. in einem Versuchstank, sondern gewartet werden muß, bis die gewünschten Bedingungen vorliegen. Zum Glück ist der zu vernünftigen Modellabmessungen passende Modellwind recht häufig anzutreffen, so daß in geeigneten Jahreszeiten derartige Versuche ohne große Wartezeiten durchgeführt werden können. Um jede gebotene Möglichkeit zu Messungen auszunutzen, ist aber eine ständige Überwachung des Modellbereichs notwendig. Eine Reihe von kennzeichnenden statistischen Meßzahlen muß ständig ermittelt werden. Das bedingt die laufende Verarbeitung einer großen Zahl von Meßdaten. Der übliche Weg — erst registrieren, dann analysieren — ist wegen des damit verbundenen Zeitverlustes nicht zweckmäßig. Außerdem würde dabei eine Vielzahl für die Versuche größtenteils wertloser Registrierungen anfallen, in denen nur schwer Ordnung zu halten wäre. Es müssen meßtechnisch neue Wege beschritten werden, um statistische Versuchsserien durchführen zu können.

Die Meßdaten werden daher sofort am Meßort statistisch ausgewertet. Eigentlich scheidet mit dieser Forderung eine zeitabhängige Messung überhaupt aus, sie läßt sich nur durch die Erfahrung rechtfertigen, daß meistens über ausreichend lange Zeit im statistischen Sinne stationäre Zustände herrschen und schon innerhalb relativ kurzer Zeiträume ausreichend genaue Kennzahlen gebildet werden können. Die maßstabsbedingte Zeitraffung im Verhältnis $\left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{-1/2}$ erweist sich dabei als außerordentlich günstig.

3.1 Seegang

Zur meßtechnischen Erfassung des Seegangs genügt die Messung der Ordinatenschwankungen über der Zeit an einem festen Punkt innerhalb des Modellgewässers, der sogenannten Seegangsfunktion z (t). Hierdurch wird bei stationären stochastischen und ergodischen Vorgängen der Seegang gut erfaßt, wenn man über eine ausreichend lange Zeit mißt.

Zwar spielen manchmal auch die Laufrichtungen β der Einzelwellen eine Rolle. Das führt jedoch zur weitaus schwierigeren Messung des Richtungsspektrums $r'(\omega', \beta')$ eines sogenannten zweidimensionalen Seeganges. Für die meisten Zwecke wird eine Beschränkung auf das eindimensionale Spektrum $r'(\omega')$ ausreichend sein.

Ergänzend sollte der quadratische Mittelwert $\overline{z^2}$ der Seegangsfunktion z (t) bestimmt werden. Um einen Zusammenhang zu messender Größen mit der Häufigkeit verschiedener Wellenamplituden herstellen zu können, muß auch diese gemessen werden, falls man nicht auf die spärlichen theoretischen Ansätze zurückgreifen will.

Die Messung der Seegangsfunktion kann durch das bekannte Prinzip erfolgen, daß zwischen zwei Spannung führenden Drähten je nach Eintauchung verschieden große Ströme fließen. Man kann damit eine der Wasserstandschwankungen an einem Punkt proportionale Spannung erhalten. Eine solche Meßeinrichtung in Transistorschaltung ist am oben genannten Institut entwickelt worden.

Gemäß der Problemstellung sollen alle statistischen Kenndaten am Meßort sofort vorliegen. Dies erfordert den Aufbau spezieller Datenverarbeitungsanlagen.

Zur Ermittlung des Spektrums wurde ebenfalls am Institut ein spezieller Analogrechner für die relativ niedrigen Frequenzen des Modellseegangs entwickelt. Seine Arbeitsweise beruht auf elektro-mechanischer Bildung der Fourier-Koeffizienten, die sich durch folgende Integrale darstellen lassen

$$a_n = \int_0^T z(t) \cos(\omega_n t)\, dt \tag{22}$$

$$b_n = \int_0^T z(t) \sin(\omega_n t)\, dt \tag{23}$$

aus denen man leicht das Spektrum erhält:

$$r(\omega_n) = \frac{1}{\triangle \omega} (a_n^2 + b_n^2) \tag{24}$$

Der Blockschaltplan in Bild 1 zeigt das Prinzip des Analysators. Die entsprechend der Seegangsfunktion modulierte Gleichspannung wird direkt elektrisch weiterverarbeitet. Die Produktbildung des Integranden erfolgt über sin-cos-Potentiometer, die sich mit der jeweiligen Filterfrequenz drehen, die Integration erfolgt durch Kondensatoren. Durch parallele Anordnung aller zur genügenden Auflösung des Spektrums erforderlichen Filter verschiedener Frequenz kann die Speicherung von z (t) wegfallen. Die gespeicherten Werte der Fourierkoeffizienten werden über einen umlaufenden Schalter der Reihe nach abgefragt [1]).

[1]) Nebenbei sei erwähnt, daß dieser Rechner auch für die Verarbeitung maritimen Seegangs geeignet ist, falls dieser in geeigneter Spannungsschwankung anfällt. Die hierbei noch geringeren Frequenzen im Vergleich zum Modellseegang sind wegen der Abhängigkeit des Filterbereiches von der Drehzahl des jeweiligen Potentiometers leicht zu bewältigen.

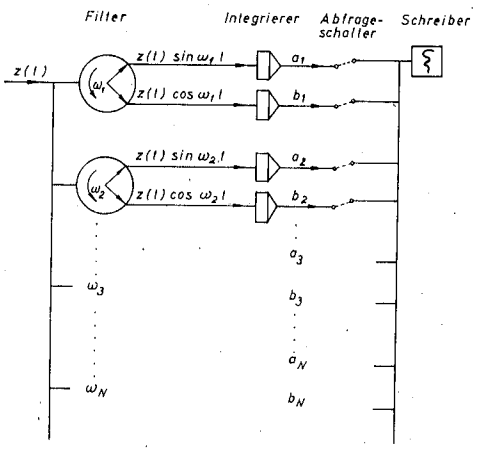

Bild 1
Prinzipschaltbild eines elektrischen Analysators für natürlichen Modellseegang

3.2 *Wind*

Nach den im ersten Teil angedeuteten Beziehungen zwischen Wind und Seegang gibt die effektive Windgeschwindigkeit am frühzeitigsten Auskunft über den zu erwartenden Seegang. Dabei ist die Wahl einer geeigneten Zeitkonstanten für die Meßeinrichtung von großer Bedeutung. Sie darf einerseits nicht zu kurz sein, damit noch eine genügend ruhige Anzeige erfolgt, andererseits nicht zu lang, damit Änderungen rechtzeitig erkannt werden können. Sinnvoll ist etwa $^1/_{10}$ der Einwirkungsdauer des Windes auf kennzeichnende Wellen. Ist also zum Beispiel die kennzeichnende Wellenlänge im Modellbereich 2 m und die Windbahnlänge 2000 m, beträgt diese 1120 sec und es wäre eine Zeitkonstante von etwa 120 sec zu wählen. Es ist weiterhin wünschenswert, den linearen Mittelwert und die Streuung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung zu erfassen. Das kann entweder durch Klassieren dieser Größen nach relativer Häufigkeit oder durch Integration über Analogrechner erfolgen. Der letzte Weg ist wegen des geringeren Arbeitsaufwandes vorzuziehen, auch wenn dabei etwas größere Fehler auftreten.

3.3 *Schiff*

Die Verwirklichung der Ähnlichkeit am Schiffsmodell und entsprechende Kontrollmessungen sind grundsätzlich einfach, erfordern jedoch eine gewisse Sorgfalt. Nach vorherigem rechnerischen Überschlag ausgelegt, führt man am Schiffsmodell folgende Versuche in glattem Wasser bzw. im Windkanal durch:

a) Krägungsversuch zur Ermittlung der Lage des resultierenden Gewichtsschwerpunktes.
b) Roll-, Stampf- und Tauchversuche zur Ermittlung der Eigenperioden und damit der Eigenfrequenzen.
c) Ausschwingversuche zur Ermittlung der Dämpfungen.
d) Messung der Windkräfte an einem Aufbautenmodell im Windkanal.

Man kann so die in (21) geforderte Ähnlichkeit

$$\frac{f}{f'} = \frac{d}{d'} = \frac{h}{h'} = \frac{k}{k'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^4$$

prüfen und durch entsprechende Korrekturen am Modell hinreichend genau herstellen.

Eine ähnliche Geschwindigkeit gemäß Bedingung (3)

$$\frac{v}{v'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{1/2}$$

wird durch entsprechende Auslegung des Antriebs nach den Ergebnissen von Meilenfahrten des Schiffsmodells erreicht.

Um ähnliche Ruderbewegungen am Schiffsmodell zu erzeugen, sind besondere Maßnahmen erforderlich. Wegen (4)

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{-1/2}$$

muß die Winkelgeschwindigkeit eines Ruderausschlages am Modellschiff immer größer als am entsprechenden großen Schiff sein. Dies ist mit direkten Ruderkommandos vom Menschen wegen der physiologischen Reaktionsverzögerung nicht mehr einwandfrei zu verwirklichen. Es muß daher eine Selbststeueranlage eingebaut werden, die selbsttätig die zur Einhaltung eines vorgegebenen Kurses nötigen Ruderbewegungen bewirkt. Für einen geraden Kurs des Schiffsmodells ist das relativ einfach durch einen kreiselgesteuerten Regelkreis zu verwirklichen.

4. Experimentelle Ermittlung von statistischen Daten

Zweifellos zeigt der gegebene Überblick die für die Modellähnlichkeit notwendigen Voraussetzungen nur in großen Zügen, immerhin aber läßt er erkennen, daß hinsichtlich der hauptsächlichsten Einflußgrößen zwischen entsprechenden komplexen Systemen einheitliche Ähnlichkeitsbeziehungen erreicht werden können. Neben Maßstabseinflüssen bei Reibungserscheinungen, für die immer auf die Möglichkeit der experimentellen Nachprüfung und Kompensation hingewiesen wurde, ist eine wesentliche Vereinfachung in den Abteilungen enthalten, nämlich die der linearen Superposition der Komponenten eines Spektrums. Wir wissen, daß mindestens im Bereich sehr großer Amplituden dieses Gesetz nicht mehr zutrifft. Es darf aber sicher angenommen werden, daß im gesamten Schwerewellenbereich die Überlagerung nach einem einheitlichen Gesetz erfolgt, und damit dürfen im Modellbereich ähnliche Abweichungen wie im Großen gegenüber linearen theoretischen Ansätzen erwartet werden. Die beschriebenen Ähnlichkeitsbeziehungen bleiben also gültig und berechtigen dazu, im Modellbereich statistische Daten zu sammeln und auf den Normalbereich zu übertragen. Die vorliegende Methode bedingt ein Erfassen auch der gesuchten Größen auf statistischem Wege, genau wie die Daten der Erregungsgrößen im statistischen Bereich betrachtet wurden. Besonders im Bereich extrem großer Amplituden, der für Sicherheitsbetrachtungen ausschließlich von Bedeutung ist, werden auf diesem Wege Ergebnisse erhalten, die wesentlich besser sind als solche, die bekannte theoretische Ansätze liefern können. Das gilt sowohl für die erregenden Kräfte von Wind und Seegang, als auch für die durch sie hervorgerufenen Schiffsbewegungen. Dabei ist der besondere Vorteil der Untersuchungen am Modell, daß ohne Bedenken auch die Vorgänge herbeigeführt werden dürfen, die im Großen vermieden werden sollen. wie etwa Kentern oder Aufsetzen auf Grund.

Theoretische Amplitudenhäufigkeitsfunktionen weisen meist Unendlichkeitsstellen auf. Praktisch gibt es aber immer eine Grenze im Endlichen, wenngleich sie nicht exakt angegeben werden kann, aber es darf als sicher gelten, daß diese bei durchaus noch vorstellbaren Werten liegt. Zwar hat der Bereich großer und extrem großer Maxima nur sehr geringen Anteil an der Häufigkeitssumme, für eine allgemeine Beschreibung von

Bewegungsvorgängen sind damit theoretische wie gemessene Häufigkeitsfunktionen gleichwertig, nicht aber, wenn wie bei Sicherheitsbetrachtungen nur dieser Bereich interessiert. Hier können, wie leicht einzusehen ist, Differenzen von Größenordnungen auftreten, so daß gemessenen Werten unbedingt der Vorzug zu geben ist gegenüber theoretisch ermittelten, die, vorsichtig ausgedrückt, außerordentlich ungenau sein können. Meßwerte sind besonders dann vorzuziehen, wenn ein vernünftiger Kompromiß zwischen wirtschaftlichkeit und Sicherheit gefunden werden muß. In den meisten Fällen ist nämlich die Häufigkeit extremer Amplituden gleichbedeutend mit dem Risikograd; bei Zugrundelegung theoretischer Häufigkeiten würde also die Sicherheit auf Kosten der Wirtschaftlichkeit erheblich erhöht. Ein weiterer Vorteil der Modellmethode ist der, daß in relativ kurzer Zeit die gleiche Informatationsmenge erhalten wird, wie durch Beobachtung im großen über Jahrzehnte. Einmal ist „extremer Seegang" im Modellmaßstab sehr viel häufiger anzutreffen als extremer maritimer Seegang, und darüber hinaus bewirkt die höhere Frequenzlage im Modellsystem eine Zeitraffung

$$T' = T \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{-1/2} \qquad (25)$$

Die Zeitraffung ergibt schnellere Versuchsdurchführung, damit größere Informationsmöglichkeit und bessere Übersichtlichkeit des Geschehens.

4.1 Durchgeführte Messungen zur Stabilität von Schiffen im Seegang

Die in Abschnitt 3 geschilderten Meßmethoden dienen in erster Linie zur Überwachung des Modellsystems, das heißt zur Prüfung der für die eigentliche Aufgabe notwendigen Ähnlichkeit.

Sie sind sehr aufwendig hinsichtlich der Meß- und Rechengeräte, die verwendet werden müssen, damit eine ständige Kontrolle der Versuchsbedingungen ermöglicht wird. Die eigentliche Meßaufgabe, die Ermittlung von statistischen Daten in Grenzbereichen zur Ermittlung von Sicherheitsgraden bzw. Festlegung von Sicherheitsgrenzen, ist dagegen einfach. Das soll am Beispiel der durchgeführten Untersuchungen über Kentersicherheit im Seegang erläutert werden.

Die Stabilität eines Schiffes, d. h. die Eigenschaft, sich aus geneigten Lagen wieder aufzurichten, ist von der Gewichtsschwerpunktlage des Schiffes und der Formschwerpunktlage des verdrängten Wasservolumens abhängig. Die Horizontalprojektion des Abstands dieser beiden Schwerpunkte, der Hebelarm des aufrichtenden Moments, ist ein Maß für die Stabilität.

Fährt ein Schiff in Wellen, so ist besonders dann, wenn Schiffslängsachse und Wellenkämme senkrecht zueinander stehen, die Form des verdrängten Wasservolumens wesentlich von dem in glattem Wasser verschieden. Damit ist aber auch die Formschwerpunktlage anders und mithin der Hebelarm des aufrichtenden Moments. Liegt das Schiff im Wellenberg, ist der Hebelarm im allgemeinen wesentlich kleiner, im Wellental dagegen größer als im glatten Wasser. Die Verringerung im Wellenberg, Ursache einer Reihe von Schiffsverlusten, ist abhängig von der Wellenform, also im wesentlichen der Wellenlänge und der Amplitude. Hinsichtlich der Länge liegt das Maximum der Abweichung bei einer Wellenlänge von etwa gleich Schiffslänge, die Abhängigkeit von der Amplitude ist in erster Näherung linear. Danach kentert ein Schiff beim Zusammentreffen mit Wellen, deren Amplitude gleich oder größer als eine bestimmte Grenzamplitude ist. Wo diese Grenze liegt, wird weitgehend durch die Stabilität in glattem Wasser bestimmt. Der Gefährdungsgrad ist identisch mit der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Amplituden oberhalb dieser Grenze.

Das sind in großen Zügen die Zusammenhänge, von denen ausgegangen wird. Es soll nun die Glattwasserstabilität bestimmt werden, die bei gegebenem Seegang einen bestimmten Sicherheitsgrad oder einen dementsprechenden Gefährdungsgrad für ein Schiff ergibt. Grundsätzlich könnte man nun im Modellversuch die Stabilität solange verändern, bis dieser Sicherheitsgrad erreicht ist und hätte damit die Aufgabe gelöst. Da dieser Wert aber sehr dicht bei 1 liegen muß — das bedeutet, daß die mittlere Kenterzeit sehr lang ist — würde das entschieden zu viel Zeit erfordern.

Zweckmäßig ist folgender Weg: Die Glattwasserstabilität wird so bemessen, daß das Modell nach einer relativ kurzen Zeit kentert. Die Zeiten werden für eine größere Zahl von Kenterfällen bestimmt und gemittelt. Diese mittlere Kenterzeit ist mit dem mittleren Zeitabstand gefährlicher Amplituden identisch und dem vorhandenen Gefährdungsgrad umgekehrt proportional.

Aus entsprechenden Wellenmessungen läßt sich die gültige Amplitudenverteilung angeben und damit die Grenzamplitude für den Gefährdungsgrad bei diesem Modellzustand ermitteln. Ebenso kann die Grenzamplitude für den zulässigen Risikograd bestimmt werden. Über den Zusammenhang zwischen Amplitude und Stabilitätsverminderung kann jetzt abschließend die für den angestrebten Sicherheitsgrad notwendige Glattwasserstabilität angegeben werden.

Versuche in der beschriebenen Art sind mit verschiedenen Schiffsmodellen auf einem Binnensee (Großer Plöner See in Schleswig-Holstein) durchgeführt worden und haben zu guten Ergebnissen geführt.

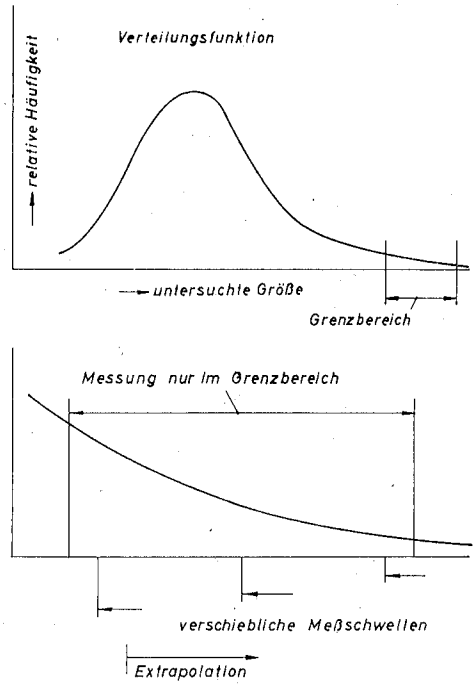

Bild 2
Darstellung einer beliebigen Verteilungsfunktion und ihres Grenzbereiches

4.2 Mindesttiefe an Löschbrücken

Bei Ermittlung notwendiger Mindesttiefen an künstlichen Löschbrücken kann ähnlich vorgegangen werden. Es wird ein Modell der geplanten Anlage in natürlicher Umgebung hergestellt. Bei einer Tiefe, bei der noch Grundberührungen auftreten, wird deren relative Häufigkeit ermittelt. Da auch hier ein direkter Zusammenhang zwischen den Wellenamplituden und den Bewegungsamplituden des Schiffes gegeben ist, läßt sich die notwendige Tiefe für den angestrebten Sicherheitsgrad entsprechend ermitteln. Die eigentliche Messung ist hier eine Zählung.

Man kann das Verfahren noch verfeinern, indem bei einigen verschiedenen Tiefen die Häufigkeit der Grundberührung ermittelt wird. Das Ergebnis ist dann direkt der Verlauf der Amplitudenfunktion im überstrichenen Bereich, von dem aus dann auf die notwendigen Tiefen für größere Sicherheitsgrade geschlossen werden kann (Bild 2). Selbstverständlich lassen sich über entsprechende Aufnehmer auch die Häufigkeitsverteilungen weiterer beliebiger Größen je nach Problemstellung in diesem natürlichen Modellsystem ermitteln, wie z. B. die der Kräfte beim Aufstoßen eines Schiffes auf den Grund etc.

5. Schlußwort

Die beschriebene Modellmethode ist ein Weg, zuverlässige, das heißt praktisch relevante statistische Daten über das Verhalten von Schiffen im Seegang zu ermitteln. Besonders dort, wo theoretische Ansätze nur qualitativen Aufschluß geben — und das ist im Bereich extrem großer Amplituden der Fall, wie sie für Sicherheitsbetrachtungen allein von Bedeutung sind — ist sie ein wertvolles Hilfsmittel, um einmal direkt Unterlagen für die Dimensionierung von Bauwerken zu erhalten, zum anderen um unser Wissen über das Verhalten unter extremen Bedingungen allgemein zu bereichern. Gerade die Grenzbelastungen sind zur Dimensionierung von Bauwerken und zur Erreichung eines gewünschten oder erforderlichen Sicherheitsgrades ausschlaggebend, und es muß bei der Auslegung ein Kompromiß zwischen notwendigem Aufwand zur Realisierung einer bestimmten Forderung und zwischen den Grenzbeanspruchungen geschlossen werden. Die jeweilige Kostenseite wird sich an Hand technischer und wirtschaftlicher Gegebenheiten leicht kalkulieren lassen. Die zum Vergleich nötige andere Seite wird durch die beschriebenen Experimente bestimmt.

So konnte z. B. im Falle der Sicherheit gegen Kentern im Seegang auf diesem experimentellen Wege nachgewiesen werden, daß sehr vereinfachte quasistationäre Berechnungen der Stabilität von Schiffen in Wellen recht zuverlässige Aussagen über die Sicherheit gegen Kentern gestatten, ein Nachweis, der theoretisch bisher nicht gelungen ist.

Es ist keineswegs so, daß in jedem Fall für ein Projekt Messungen notwendig werden. Schon die Ergebnisse einiger durchgeführter Meßserien gestatten es in einem relativ großen Parameterbereich mit einfachen theoretischen Ansätzen zu operieren. Gerade diese Möglichkeit, durch Messungen innerhalb eines komplexen Systems den Geltungsbereich theoretischer Ansätze abzugrenzen, ist eine hervorstechende Eigenschaft der beschriebenen Methode.

Schrifttumsverzeichnis

[1] Bartsch, H.: 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.

[2] Bartsch, H.: Zur statistischen Verteilung der Wellenhöhen im Seegang sowie der Stampf- und Rollwinkel eines Schiffes im Seegang. Hamburgische Schiffbauversuchsanstalt, Bericht Nr. 1173 (1959).

[3] Cramer, H.: Methematical Methods of Statistics. Princtown University Press, 6. Aufl., 1954.

[4] Dietrich, G. und K. Kalle: Allgemeine Meereskunde. Verlag Gebrüder Borntraeger. Berlin 1957.

[5] Giloi, W. und R. Lauber: Analogrechnen, Programmieren, Arbeitsweise und Anwendung des elektronischen Analogrechners. Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 1963.

[6] Grim, O.: Rollschwingungen, Stabilität und Sicherheit im Seegang. Schiffstechnik Bd. 1 — 1952 — Heft 1, S. 10/21.

[7] Grim, O.: Beitrag zu dem Problem der Sicherheit des Schiffes im Seegang. Schiff und Hafen, Juni 1961.

[8] Kastner, S.: Kenterversuche mit einem Modell in natürlichem Seegang. Schiffstechnik Bd. 9 — 1962 — Heft 48, S. 161/164.

[9] Kastner, S.: Modellversuche in achterlichem Seegang mit dem Küstenmotorschiff „Lohengrin". Hansa 101. Jg. 1964, Nr. 12, S. 1212/1217.

[10] Lamb, H.: Hydrodynamics. Deutsche Übersetzung Leipzig 1931, 2. Aufl.

[11] Longuet-Higgins, M. S.: On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves. Journal Maritime Research 11, Nr. 3 — 1952.

[12] Neumann, G.: On ocean wave spectra and anew method of forecasting wind-generated sea. Beach Eros. Bd. Techn. Mem. No. 56 (1954).

[13] Paulling, J. R.: Stability and Rolling of Ships in a Following Sea. University of California, Institute of Engineering Research, Berkeley, Cal. 1958.

[14] Paulling, J. R.: The Transverse Stability of a Ship in a Longitudinal Seaway. Journal of Ship Research, Vol. 4, Nr. 4, März 1961, S. 37/49.

[15] Rahola, J.: The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability, Dissertation Helsinki 1939.

[16] Roden, S.: Beeinflussungen der Stabilität der „Pamir" durch Seegang. Hansa 95 — 1958 — S. 435/437.

[17] Roden, S.: Welche Ergebnisse liefern Kenterversuche mit Modellen? Schiffstechnik Bd. 9 — 1962 — Heft 48, S. 165/169.

[18] Roden, S.: Modellversuche in natürlichem Seegang. Jb. der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Bd. 56 — 1962 — S. 132/143.

[19] Roll und Fischer: Eine kritische Bemerkung zum Neumann-Spektrum des Seegangs. Deutsche Hydrographische Zeitschrift Bd. 9 — 1956 — S. 9/14.

[20] Schlitt, H.: Systemtheorie für regellose Vorgänge. Statistische Verfahren für die Nachrichten- und Regeltechnik. Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957.

[21] St. Denis, M. und W. J. Pierson: On the Motion of Ships in Confused Seas. SNAME 1953, S. 280/332.

[22] Sverdrup-Johnson-Fleming: The Oceans, New York, Prentice-Hall, Inc. 1942.

[23] Walden, H. und J. Piest: Vergleichsmessungen des Seeganges. Einzelveröffentlichung Nr. 30 des Deutschen Seewetteramtes Hamburg.

[24] Weinblum, G. und M. St. Denis: On the Motions of Ships at Sea. Transactions SNAME — Bd. 58 — 1950, S. 184/248.

[25] Wendel, K.: Stabilitätseinbußen im Seegang und durch Koksdecklast. Hansa Bd. 91 — 1954 — S. 2009/2022.

[26] Wendel, K. und W. Platzoeder: Der Untergang des Segelschulschiffes „Pamir". Hansa Bd. 95 — 1958 — S. 367 ff.

[27] Wendel, K.: Sicherheit gegen Kentern. VDI-Zeitschrift Bd. 100, (1958) Nr. 32, S. 1523/1533.

[28] Wendel, K.: Die Wahrscheinlichkeit des Überstehens von Verletzungen. Schiffstechnik Bd. 7 — 1960 — S. 47/61.

[29] Wendel, K., K. Knüpffer und O. Krappinger: Sicherheit durch Unterteilung. Jb. der Schiffbautechnischen Gesellschaft — Bd. 55 — 1961.