

Seegangsforschung.

VON GEORG WEINBLUM, Berlin.

Die Oberflächenwellen, die keinen Windwirkungen unterliegen, heißen *Dünung*; die vom Wind erregten Wellen seien mit *Windsee* bezeichnet, im Gegensatz zu einer immer noch anzutreffenden Gepflogenheit in Seefahrtskreisen, wonach die Windsee Seegang genannt wird. Wir fassen mit dem Ausdruck *Seegang* sowohl die Dünung wie die Windsee, also alle an einer bestimmten Stelle auftretenden Oberflächenwellen, zusammen; diese Definitionen scheinen trotz der erwähnten Schwierigkeit am besten geeignet zu sein, denn wir brauchen einen Sammelnamen, der alle Erscheinungen deckt, wie auch Bezeichnungen, welche die übliche grundlegende Unterteilung ermöglichen; überdies sind die gewählten Definitionen genügend anerkannt und verbreitet.

Die Ergebnisse der Seegangsforschung sind seit alters her für die Schifffahrt wichtig, neuerdings aber auch für den Wasserbau und die Luftfahrt, insbesondere die Seefliegerei. Wir erwähnen schon hier die technischen Forderungen, von denen wir ausgehen, weil sie in vielen Fällen ein ordnendes Prinzip bilden können; die Bedeutung eines solchen für die Beschreibung von Vorgängen, deren Kennzeichen die Unregelmäßigkeit und Flüchtigkeit ist, liegt auf der Hand.

Es ist nicht unsere Aufgabe, die Theorie der permanenten Oberflächenwellen zu entwickeln oder auf die Geschichte der Seegangsforschung einzugehen; hierüber findet man alles Notwendige in leicht faßlicher Form bei THORADE, „Probleme der Wasserwellen“¹, wo auch ein vollständiges Literaturverzeichnis vorhanden ist. Ich knüpfte an das genannte Werk an, um über die neuesten Ergebnisse zu berichten und einige Gesichtspunkte zu betonen, die für die fernere Entwicklung des Problems von Wichtigkeit sind.

Die Aufgabe der Seegangsforschung ist erledigt, wenn wir auf Grund meteorologischer Angaben und sonstiger Anfangsdaten den Seegang an einer bestimmten Stelle mit einer vorgegebenen Genauigkeit beschreiben können. Schematisch gesprochen, kann die Lösung auf zwei Wegen erfolgen; der erste besteht in der Anwendung der theoretischen und experimentellen Hilfsmittel der Hydrodynamik, der zweite in einer beschreibenden Statistik; natürlich können sich die beiden Methoden überschneiden und ergänzen.

Wegen der Kompliziertheit der allgemeinen Aufgabe gehen wir bei Anwendung der Hydrodynamik, wie überhaupt in der Mechanik, so vor, daß wir kennzeichnende Teilprobleme herausgreifen oder mechanische Gedankenmodelle schaffen, von denen das wichtigste folgendes ist: wir

suchen den Seegang, der auf einer ursprünglich ebenen Wasseroberfläche bei konstanter Windstärke und Richtung entsteht, als Funktion der Zeit, gerechnet vom Einsetzen des Windes, und der Länge der freien Windbahn, zu bestimmen. Dies ist eine klar umrissene Fragestellung, die sich weitgehend experimentell verwirklichen läßt; in der Natur werden die Voraussetzungen des Gedankenmodells nur selten genau genug erfüllt sein. Die klassischen Betrachtungen von KELVIN über die Stabilität der Wasseroberfläche tragen, wie schon LAMB bemerkt hat, zur Lösung dieser Aufgabe nichts bei; die ersten Bemühungen, das Zustandekommen von Wellen durch Wind mit physikalischplausiblen Ansätzen rechnerisch zu behandeln, gehen auf JEFFREYS zurück². Die Überlegung, daß in Wirklichkeit der Luftdruck p auf der Luv- und Leeseite einer Welle verschieden sein muß, legt einen empirischen Ansatz für p in Abhängigkeit vom Staudruck, dem Wellengradienten und einem „Abschirmbeiwert“ („sheltering coefficient“ s) nahe. Obgleich der Aufbau einer solchen Formel recht roh ist und sich einige weitergehende Folgerungen von JEFFREYS nicht aufrechterhalten lassen³, bedeutet doch seine Arbeit einen wichtigen Schritt voraus. Zur Bestimmung des Beiwertes „ s “ hat JEFFREYS die kritische Geschwindigkeit des Windes u_k — sie gibt bekanntlich die geringste Luftgeschwindigkeit an, die Wellen auf einer ebenen Oberfläche erregen kann, und spielt schon bei KELVIN eine entscheidende Rolle — herangezogen und u_k aus primitiven Beobachtungen auf Teichen zu etwas über 1 m/s ermittelt gegen $u_k \approx 6,4$ m/s nach KELVIN. STANTON hat $u_k \approx 2,5$ m/s gemessen⁴; von mir in der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau mit Unterstützung der JAGOR-Stiftung durchgeführte Versuche zeigen den etwas niedrigeren Wert ≈ 2 m/s.

Die von STANTON und seinen Mitarbeitern und uns benutzte Versuchseinrichtung — ein „Wind-Wasserkanal“ — bestand im wesentlichen aus einer langen geschlossenen Rinne von rechteckförmigem Querschnitt (Fig. 1); sie war nur zum Teil mit Wasser gefüllt, so daß die Oberfläche einem Luftstrom mit verschiedenen Geschwindigkeiten u ausgesetzt werden konnte. Fig. 2 zeigt eine Aufnahme von Windwellen bei $u \approx 4$ m/s

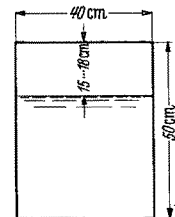


Fig. 1. Querschnitt durch den Windwasserkanal der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin.

im Abstand von 10 m von der Eintrittsstelle der Luft („freie Windbahn“ 10 m).

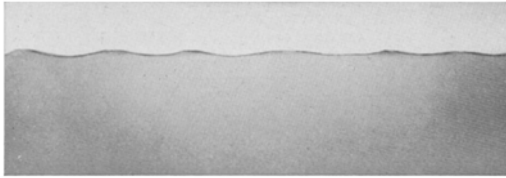


Fig. 2. Windwellen im Kanal der Fig. 1.

STANTON hat noch eine zweite mittelbare Versuchsmethode zum Studium der Windwellen vorgeschlagen; sie besteht in Druckmessungen an festen, z. B. aus Holz gefertigten Wellenprofilen, die von einem Luftstrom angeblasen werden.

Mit diesem Verfahren hat MOTZFELD³ verschiedene wichtige Einsichten gewonnen; insbesondere erweist sich die genaue Untersuchung der Luftströmung über den festen Wellen, die auf Grund von Gedankengängen von PRANDTL hier erstmalig durchgeführt ist, als sehr fruchtbar. Mit Hilfe eines empirischen Ansatzes bestimmte MOTZFELD aus dem Widerstandsbeiwert den Abschirmkoeffizienten „s“ von JEFFREYS und gelangt auf Grund von Energiebetrachtungen zum Schluß, daß die ebene Wasserfläche für jede Windstärke unstabil ist. Freilich bleibt die Wellenamplitude bei kleinen Windgeschwindigkeiten so gering, daß sich die Richtigkeit des von MOTZFELD errechneten Ergebnisses mit einfachen Hilfsmitteln experimentell nicht überprüfen läßt. Im Bereich von 1–2 m/s Windgeschwindigkeit konnte ich nur ein leichtes Vibrieren der Wasseroberfläche beobachten, das sich grundsätzlich von den später auftretenden Wellen unterscheidet. Dabei war bezeichnend, daß bei den genannten geringen Windstärken selbst durch elastische Schwingungen angefachte kurze Wellen bald wieder abklagen. — Somit ist noch nicht einmal das einfache Problem der kritischen Geschwindigkeit genügend geklärt.

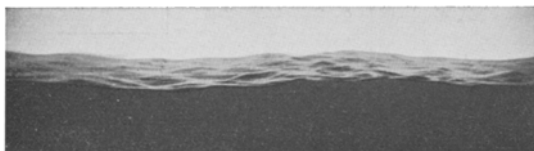
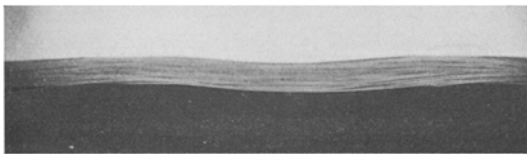


Fig. 3 und 4. Mit Tauchkolben erzeugte Wellen ohne und mit Einwirkung des Windes (∞ 4 m/s).

Erwähnt sei noch ein in den Fig. 3 und 4 dargestellter Versuch, den Einfluß des Windes auf freie Wellen (Dünung) zu beobachten; letztere wurden in üblicher Weise durch einen Tauchkolben

erzeugt, und zwar ohne (Fig. 3) und mit (Fig. 4) Windwirkung. Augenscheinlich war die freie Windbahnlänge zu gering, um eine Verformung des ursprünglichen Profils als Ganzes durchzuführen; das Verfahren kann also nicht manche Experimente in größeren Kanälen ersetzen, wie ursprünglich erhofft wurde, es soll aber einen Bestandteil späterer Untersuchungen in größerem Maßstabe bilden.

Die kleinen Abmessungen der bislang benutzten Vorrichtungen und der geringe Umfang der beschriebenen Versuche, lassen quantitative Schlüsse nur in beschränktem Maße zu; wir fassen die Ergebnisse wie folgt zusammen:

- a) die Wellenlänge λ wächst schnell über die Windbahn,
- b) sie ist der Windgeschwindigkeit annähernd proportional;
- c) die endgültige Wellenform ist schnell erreicht;
- d) nach STANTON gehören im Einklang mit Folgerungen von MOTZFELD zu größeren Wellenlängen λ größere Verhältnisse Wellenhöhe h zu λ (die Wellen sind steiler);
- e) die Wellengeschwindigkeit c entspricht annähernd der einer freien Welle; $c \approx \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$ (g = Erdbeschleunigung).

Bemerkenswerterweise bestätigt sich die Beziehung (1) sowohl bei Versuchen wie bei Beobachtungen in der Natur recht gut; es ist deshalb empfehlenswert, auf See die schwer zu schätzenden Wellenlängen aus den Perioden τ nach der Formel

$$\lambda \approx \frac{g}{2\pi} \tau^2 \quad (2)$$

zu berechnen.

Nur bei sehr steilen Wellen werden die Wellenlängen nach (2) etwas zu groß ausfallen. Bei flachem Wasser führt man in (2) einen Faktor κ ein,

$$\lambda \approx \frac{g}{2\pi} \tau^2 \kappa. \quad (3)$$

den man aus der Kurve Fig. 5 abgreift; κ ist eine Funktion der Wassertiefe H und der Wellenperiode, $\kappa = \kappa\left(\frac{H}{g\tau^2}\right)$ und gleich $\Im g \frac{2\pi H}{\lambda}$.

Für eine Berechnung des Seegangs in der Natur erhalten wir aus den besprochenen Versuchen noch keinerlei Unterlagen; wir haben uns eingehender mit ihnen befaßt, weil die Methode grundsätzlich aussichtsreich erscheint. Als nächste Aufgabe ist daher eine Vergrößerung der Wind-Wasserkanäle auf freie Windbahnen von 100 oder mehr Meter Länge bei entsprechenden Querschnitten anzustreben. Diese Forderung läßt sich ohne unzulässigen Aufwand dadurch erfüllen, daß man gelegentlich große Rinnen der Wasserbauversuchsanstalten, die zu anderen Zwecken notwendig sind, sinngemäß ausbaut. Durch den Vergleich der in einem großen Kanal gewonnenen Ergebnisse mit denen aus Druckmessungen, wird man voraussichtlich ein Stück weiter kommen, auch hinsichtlich der Struktur einzelner Windwellen.

Auch zahlreiche andere Probleme, die mit Wasserwellen zusammenhängen, sind dem Modellversuch bequem zugänglich; um nur eins zu nennen — die Verformung von Oberflächenwellen beim Übergang von tiefem auf flaches Wasser. Allgemeiner gesprochen, können verschiedene schwierige Randwertaufgaben über Wellenbewegungen, sofern die Windwirkung keine bedeutende Rolle spielt, modellmäßig angenähert gelöst werden. Das Wasserbauversuchswesen macht hiervon weitgehend Gebrauch; da es sich aber meist um die Erledigung von Fällen ad hoc handelt, wobei die grundsätzlichen Fragen zurücktreten, ist die wissenschaftliche Ausbeute solcher Experimente vorläufig gering gegenüber der aus bekannten Versuchen früherer Zeit.

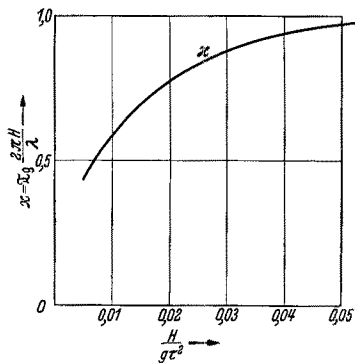


Fig. 5. Reduktionsfaktor α in Formel (3) zur Bestimmung der Wellenlänge λ auf flachem Wasser der Tiefe H m aus der Wellenperiode τ s in Abhängigkeit von $H/g\tau^2$; $g =$ Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$.

Noch weniger haben die in Schiffbauversuchsanstalten üblichen *Modellversuche* im „*künstlichen Seegang*“, die zwecks Beobachtung der See-Eigenschaften von Fahrzeugen unter vereinfachten Annahmen vorgenommen werden, zur Lösung unserer Aufgabe beigetragen, obgleich neuerdings KEMPF versucht hat, eine Korrelation zwischen Modell und wirklichem Seegang herbeizuführen; man kann aber solche Versuche hier erwähnen, weil durch sie zahlreiche Aufgaben an die Seegangsforschung gestellt werden.

Der Erfolg der bisher besprochenen Bemühungen ist am Umfang der Aufgabe gemessen verschwindend gering. Da man die Wellenerscheinungen, insbesondere die größten, auf wichtigen Gewässern und an Küsten aus verschiedenen Gründen, die wir später eingehender besprechen wollen, kennen muß, bleibt als einziger Weg die unmittelbare Schätzung oder Messung, die zu einer beschreibenden Statistik führen kann. Selbstverständlich braucht die Beobachtung der Naturvorgänge sich nicht nur auf die Registrierung einzelner Tatsachen zu beschränken, sie kann, ähnlich wie der Modellversuch, zur Feststellung allgemeinerer Zusammenhänge führen, insbesondere auch unter sehr günstigen Umständen zu den gesuchten Beziehungen zwischen Wind und

Seegang; in dieser Richtung ist von verschiedenen Forschern, wie GAILLARD, STEVENSON und CORNISH, wertvolle Arbeit geleistet worden, die ihren Niederschlag in mehreren Annäherungsformeln gefunden hat (vgl. z. B. THORADE, S. 50/51). Wir wollen auf diese Ergebnisse nicht eingehen, da sie nicht als wissenschaftlich gesichert angesehen werden können. Grundsätzlich ist die Methode, gleichzeitig sorgfältige Wind- und Wellenmessungen über geeignete Windbahnen anzustellen, aussichtsreich, und es ist zu hoffen, daß man dergleichen Versuche trotz der verschiedenen, zum Teil prinzipiellen Schwierigkeiten wieder in größerem Umfange in Angriff nehmen wird.

Wir wenden uns jetzt der statistischen Wellenforschung zu*. — Wir müssen zunächst feststellen, daß allein schon die Beschreibung der Wellenvorgänge auf See eine schwierige Angelegenheit ist. Früher, als es noch kaum brauchbare Meßinstrumente gab, wurde der Seegang ausschließlich geschätzt; die Ergebnisse werden auch heutzutage noch in der Schifffahrt nach Seegangsstärken — „Seegang 1—9“ — klassifiziert; als ungefähre Leitzahl liegt dieser Einteilung die Wellenhöhe zugrunde. Dieses Verfahren hat der Navigation wertvolle Dienste geleistet; wegen der Einfachheit der Schätzung kann man ohne Mühe beliebig viel statistische Daten sammeln, die immerhin einen ersten Anhalt geben. Da wir es mit einer räumlichen und zeitlichen Mannigfaltigkeit der Erscheinungen zu tun haben, ist eine große Zahl von Angaben Voraussetzung für die Brauchbarkeit der statistischen Methode; die Fülle des Materials kann bis zu gewissem Grade mit der geringen Genauigkeit der Einzelbeobachtung aussohnen. Trotzdem versagt die übliche Bezeichnungsweise nach Seegängen in der Regel vollständig, wenn man Unterlagen für konkrete technische Aufgaben braucht, weil sie zu roh, unvollständig und unbestimmt ist. Wissenschaftlich gesehen ist ein Maßstab, dessen Teilung kaum festliegt und für verschiedene Gewässer verschieden ist — z. B. bedeutet „Seegang 3“ in der Ostsee, Nordsee und im Atlantischen Ozean verschieden hohe Seegänge — ein Unding. Die Einführung zuverlässiger Meßmethoden statt des subjektiven Schätzens wird daher den Ersatz der alten Seegangsklassifikation durch eine einwandfreiere neue zwangsläufig nach sich ziehen; das wird natürlich erst möglich sein, wenn genügend Material vorliegt, und man soll die Schwierigkeit, eine prägnante Skala zu finden, die den verwickelten Erscheinungen gerecht wird, nicht unterschätzen.

Die Entwicklung der Verfahren, die den Zwecken der Seegangsmessung dienen, hat in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte gemacht. Die von KOHLSCHÜTTER und LAAS erstmalig benutzte stereophotogrammetrische Methode vermag trotz ihrer Abhängigkeit von Belichtungsverhältnissen Außerordentliches zu leisten^{9, 13}. Ein

* Auf die *meteorologischen* Fragen wird hier nicht eingegangen.

weiteres wichtiges Hilfsmittel, das besonders in den Küstengewässern schon unentbehrlich geworden ist und der Luftfahrt nützliche Dienste geleistet hat, stellt die Seegangsboje nach W. PABST der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL.) vor⁷; ihre Anwendung ist auf feste Standorte oder ruhendes Schiff beschränkt. Das Wirkungsprinzip dieses geistvollen Apparates, der aus einer Boje und einem an einem langen Kabel aufgehängten Druckmesser besteht, beruht auf dem schnellen Abklingen der Wellen mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche. G. WEISS hat auf der „San Francisco“ die Wellenkontur am Schiff nach einem elektrischen Kontaktverfahren gemessen¹⁴; auch diese Vorrichtung, die besonders für schiffbauliche Zwecke geeignet ist, leistet mehr, als man anfangs vermutet hatte, denn es ist gelungen, aus zahlreichen Aufnahmen ganze Wellenfolgen zu konstruieren¹², wenn auch der rein hydrodynamisch oder ozeanographisch orientierte Forscher die Deformationen der Welle durch die Bewegungen des Schiffsrumpfes nur ungern in den Kauf nehmen wird.

Wir untersuchen jetzt, welche Angaben über den Seegang für die Technik wichtig sein können, und beginnen mit den Problemstellungen des Schiffbaues, die wir etwas eingehender betrachten wollen, um wenigstens einen Fall gründlich zu beherrschen.

Der Seegang ruft *Beanspruchungen* des Schiffsrumpfes hervor und versetzt ihn in *Bewegungen*; wir nennen das *Rollen* oder Schlingern (Drehung um die Längsachse, auch „Krängen“), *Stampfen* (Drehung um die Querachse), *Gieren* (Pendeln um Kursrichtung, Drehung um Hochachse) und *Tauchen* (vertikale Schwerpunktsbewegung). Entscheidend für die Erfassung dieser Vorgänge ist die Kenntnis folgender Werte: Abmessungen der *größten Wellen* — Höhe h und Länge λ , größter Gradient, Form. Ebenso wichtig wie diese Angaben sind Feststellungen über die *Struktur* des *Seeganges*, d. h. darüber, ob sich der Seegang aus einer größeren Anzahl einigermaßen regelmäßiger Wellen zusammensetzt. In der Theorie der Schiffsbewegungen gehen wir von einem hypothetischen regelmäßigen Seegang aus; hierdurch wird die Anwendung der elementaren Schwingungslehre ermöglicht, die auf die hervorragende Bedeutung von Resonanzerscheinungen für die Sicherheit und günstigen Eigenschaften eines Schiffes hinweist; es ist deswegen von grundlegender Bedeutung, zu wissen, wieweit die Anschauung vom idealen Seegang der Wirklichkeit entspricht.

Die augenfälligste Größe ist zweifellos die Wellenhöhe h ; man betrachtet sie mit Recht als kennzeichnenden Faktor des Seeganges. Demgegenüber wird die Bedeutung der Wellenlänge λ oft unterschätzt; schon die Tatsache, daß die Periode der Welle eindeutig durch λ festgelegt ist, zeigt, daß die Kenntnis der Wellenlänge ebenso wichtig wie die der Höhe sein kann. Die vom

Seegang aufs Schiff ausgeübten *Krümmungsmomente* hängen *ceteris paribus* im wesentlichen von dem größten Gradienten ($\pi h/\lambda$ für harmonische Wellen) oder dem ihm proportionalen Ausdruck h/λ ab; daneben tritt bei den *Giermomenten* in geringerem Umfange und bei *Stampfmomenten* in entscheidendem Maße eine Abhängigkeit von dem Verhältnis Wellenlänge λ zu Schiffslänge L auf (Fig. 6), desgleichen auch für die *Tauchschwingungen* erregenden *Kräfte*.

Damit sind klare Forderungen für die statistische Wellenforschung gegeben. Es handelt sich darum, möglichst große Wellenfelder zu messen, aus denen nicht nur Höhe und Länge einer einzelnen Welle hervorgeht, sondern auch die Struktur des Seeganges, die uns unter anderem die

Abweichungen vom regelmäßigen Seegang angibt. Daneben interessieren auch „pathologische“ Ausartungen, wie Pyramidenseen und besonders große Gradienten, letztere selbst über kleine Bereiche im Hinblick auf kurze Fahrzeuge und Seeflugzeuge; dagegen können verschiedene Nebenerscheinungen außer acht gelassen werden.

Der *Wasserbau* braucht vor allem Angaben über die größten Höhen der vorkommenden Wellen, da diese in erster Linie die erforderliche Standsicherheit der Bauwerke bestimmen. Hier hat sich eine Unterschätzung der an bestimmten Orten auftretenden maximalen Wellen häufig gerächt, worüber in den Berichten des Weltkongresses für Schifffahrt in Brüssel 1935⁶ wertvolles Material zu finden ist.

Wie mangelhaft unsere Kenntnis von den Wellenerscheinungen in den wichtigsten Küstengewässern ist, trat weiter zutage, als die *Seefliegerei* die Forderung nach Unterlagen über die Sicherheit von Notlandungen und Startmöglichkeiten stellte; zwangsläufig ergab sich daneben die Unzulänglichkeit und Willkür der üblichen Seegangsbezeichnungen. Mit der Energie, die alle Unternehmungen dieses neuen Zweiges der Technik kennzeichnet, ist man hier im Rahmen der Lilienthal-Gesellschaft ans Werk gegangen; es liegen schon wertvolle Forschungsberichte vor⁸.

Wir betrachten kurz einige Ergebnisse der neuesten Messungen und die aus ihnen resultierenden Folgen.

Ich habe an anderen Stellen mehrfach darauf hingewiesen^{9, 10}, daß frühere Angaben über die *größten* in bestimmten Meeresteilen auftretenden Wellen durchweg zu überprüfen sind; wir dürfen ihnen grundsätzlich keine größere Bedeutung

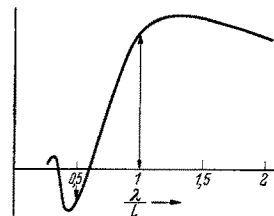


Fig. 6. Beispielhafter Verlauf der Stampfbewegungen hervorruhenden *Auftriebsmomente* in Abhängigkeit vom Verhältnis Wellenlänge λ zu Schiffslänge L (gleiche Wellenhöhen h , „idealer“ Seegang).

zubilligen, nachdem der erfahrenste lebende Beobachter V. CORNISH in seinem letzten Buche¹¹ ausführlich die Gründe für die Unterbewertung der Wellenlängen dargelegt und E. MEWES durch Vergleich von Schätzungen und Messungen⁸ gezeigt hat, daß geübte Feuerschiffskapitäne die Wellenlängen in der Nordsee 2—4mal zu kurz angaben. Die Zusammenstellung in dem ausgezeichneten Buch von THORADE¹ über größte Wellenabmessungen (S. 52/53) ist überholt.

Nach unseren stereophotogrammetrischen Messungen⁹ treten auf dem wichtigsten Schiffahrtsweg, dem Nordatlantischen Ozean, normalerweise bei schweren Stürmen Wellen von 14 m Höhe und etwa 200 m Länge auf; die größte festgestellte Höhe war 16 m und die Länge ungefähr 300 m. Wir müssen daher CORNISH Recht geben, daß Einzelwellen von über 20 m und gewaltigen Längen vorkommen können, bei deren Entstehung natürlich auch Interferenz eine Rolle spielen mag. Jedenfalls sind die Sturmwoogen hier mindestens 50 % höher und mehr als doppelt so lang, als in der offiziellen Literatur zu lesen stand.

Diese Ergebnisse besitzen eine erhebliche praktische Bedeutung aus folgenden Gründen^{10, 10a}. Bei der Bemessung der großen Schnelldampfer wurde oft die Meinung vertreten, daß diese Riesenschiffe ziemlich unangefochten von schwerem Seegang ihre Reisen zurücklegen könnten, denn bei einer damals als maximal angesehenen Wellenlänge von 130—140 m hätten sich nur in Ausnahmefällen große Stampfeschwingungen, die die Fahrt hemmen und schließlich die Sicherheit gefährden, ausbilden können. In Wirklichkeit erreichen, wie wir gesehen haben, die Wellen bei schweren Stürmen die volle Schiffslänge (250—300 m); damit treten (Fig. 6) ungeheure erregende Stampfmomente auf, deren Wirkung auf das Schiff durch Resonanz verstärkt werden kann. Die optimistischen Anschauungen über das Verhalten dieser Fahrzeuge in orkanartigen Stürmen haben sich nicht erfüllt, da sie auf falschen Voraussetzungen beruhten; auch die neuesten „Überschnelldampfer“ müssen gelegentlich aus Gründen der Sicherheit ihre Geschwindigkeit herabsetzen.

Glücklicherweise haben sich die Ingenieure bei der Bemessung der Festigkeit von Schiffen selten um die unsicheren Angaben der Wellenforschung gekümmert, sondern die tragenden Verbände so berechnet, daß sie den ungünstigen Fällen der Beanspruchung, die bei einer Schiffslänge ungefähr gleich Wellenlänge eintreten, standhalten. Die Überraschungen hinsichtlich der größten Wellenabmessungen, insbesondere ihrer Längen, die man auch auf anderen Meeren erwarten muß, werden sich daher nur so auswirken, daß die Bewegungen der Schiffe ungünstiger werden als man vermutet hatte.

Auch die größten Wellenabmessungen in den Nebenmeeren sind früher unterschätzt worden. Nach der Mitteilung von MEWES⁸ hat man in der Nordsee beim Feuerschiff Borkumriff Wellen von

8—9 m Höhe und 125 m Länge geschätzt. (Die Angabe über die Wellenlänge bei MEWES $\lambda = 150$ m ist nach Fig. 5 zu korrigieren.)

Im Mittelmeer ist am Hafen von Algier eine Welle von 9—10 m Höhe und 200 m Länge beobachtet⁶, während man der Berechnung der Hafemole $h = 5$ m $\lambda = 80$ m zugrunde gelegt hatte. Hier ist der Irrtum über die Größenordnung des Seeganges nicht so harmlos abgelaufen, wie in manchen anderen Fällen, denn die genannte Welle hat einen großen Teil der neu erbauten Hafemole zerstört. Welche Abmessungen der Seegang im offenen Mittelmeer erreicht, läßt sich hieraus nicht abschätzen, wahrscheinlich wird es wesentlich länger werden können, als man bisher vermutete ($\lambda \approx 100$ m).

Die Frage, in welchen Gegenden des Weltmeeres die größten Wellen überhaupt auftreten, ist zur Zeit völlig offen, da frühere Angaben über die maximalen Abmessungen von Wellen im südlichen Weltmeer nicht über das hinausgehen, was wir auf dem Atlantischen Ozean beobachtet haben.

Diese Beispiele zeigen zur Genüge, wie sehr die Wellenforschung bis vor kurzem im argen lag; es wird daher ausgedehnter systematischer Messungen auf allen wichtigen Gewässern bedürfen, um nur die wichtigsten *praktischen* Forderungen zu befriedigen. Brauchbare Ergebnisse wird man von Beobachtern erwarten dürfen, die an gleichzeitigen Messungen und Schätzungen geschult sind.

Gegenüber den Fragen der Größenordnung des Seeganges tritt vorläufig das ebenfalls grundlegende Problem der Wellenform, das den Gegenstand zahlreicher theoretischer Untersuchungen gebildet hat, etwas zurück. Gute Meßbilder von hoher Dünung, die vom Standpunkt der Theorie besonders interessant wären, sind mir nicht bekannt. Es liegen verhältnismäßig zahlreiche Wellenprofile vor, an denen sich die Beobachtung bestätigt, daß die Leehänge zum Teil wesentlich steiler als die Luvhänge sind. Besonders sei auf die schönen Bilder von H. SCHUMACHER¹³ und auf eine von G. SCHNADEL aus den Messungen nach WEISS (Meßfahrt „San Francisco“) konstruierte Welle hingewiesen¹², die bei der stattlichen Höhe von ungefähr 14 m eine Länge von nur etwa 185 m besitzt, also ein Verhältnis h/λ von fast 1 : 13. Irgendwelche Zusammenhänge zwischen dem Verhältnis h/λ und der Wellenlänge lassen sich vorläufig nicht angeben; die gelegentlich hierüber mitgeteilten Erfahrungszahlen sind daher mit Vorsicht aufzunehmen. — Ebenso ist es zur Zeit noch müßig, nach mathematischen Kurven Ausschau zu halten, die eine Approximation der gemessenen Werte gestatten; einmal paßt eine Trochoide, das andere Mal ein Zug gebrochener Geraden⁹. Einige Angaben über große Wellengradienten finden sich in den am Schluß genannten Arbeiten^{9, 13}.

Die subjektive Beobachtung weist darauf hin, daß auch in schwerer Sturmsee eine größere Anzahl einigermaßen gleicher Wellenberge hinter-

einander abrollen, Voraussetzungen für eine Resonanz also gegeben sein könnten⁹. Meßwerte sind nur für kleine Seegänge der Küstengewässer bekannt; W. PABST hat aus solchen den zeitlichen Verlauf der mittleren und größten Wellenhöhen graphisch dargestellt⁷, wobei sich in diesem Falle ergab, daß die letzteren etwa doppelt so groß wie die ersteren waren; d. h. die Streuung ist sehr stark. Hinsichtlich der Struktur des Seeganges befinden wir uns im Anfangsstadium der Erkenntnis, wenn auch noch manche Ergebnisse der Meßfahrten auf der „San Francisco“¹² und „Deutschland“¹³ zu erwarten sind.

Bei dem mehr als dürftigen Stand der Wellenforschung ist es, wie wir schon betont haben, noch verfrüht, Vorschläge für eine neue Klassifizierung der Seegänge statt der alten, technisch unbrauchbaren zu machen. Als Hauptleitzahl wird die Wellenhöhe, vielleicht in der Form der Angabe des Schwankungsbereiches erscheinen, als Beizahl die Wellenlänge; mindestens ein Hinweis auf den Charakter (längere regelmäßige Folgen) wird erforderlich sein, dazu gegebenenfalls eine Trennung von Windsee und Dünung, wie heute üblich. Es ist aber nicht zu zweifeln, daß man eine vernünftige Beschreibung finden wird, wenn wir erst etwas klarer sehen, was an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten auf See tatsächlich geschieht.

Der notwendigerweise flüchtige Überblick lehrt uns, daß die Seegangsforschung sich in vielen Beziehungen in den Anfängen der Entwicklung befindet. Es ist bis jetzt nicht geglückt, festzustellen, wieweit die Dünung der Theorie der permanenten freien Oberflächenwellen entspricht; zum Studium der Entstehung der Windsee und der Struktur der Windwellen trägt letztere wenig bei. JEFFREYS und STANTON haben Methoden vorgeschlagen, die als Ausgangspunkt für das wissenschaftliche

Experiment geeignet erscheinen; es erhebt sich die Forderung, eine geeignete Versuchsanlage in großem Maßstabe zu schaffen, in der die Probleme weiter geklärt werden können.

Die statistische Wellenforschung ist früher zum großen Teil Angelegenheit von Liebhabern gewesen, denen wir manche Einsichten verdanken; die älteren *quantitativen* Ergebnisse, insbesondere über die größten Wellen auf einzelnen Meeresteilen, waren notwendigerweise unzulänglich, in vielen Fällen falsch. Die gegenwärtige Entwicklung auf wissenschaftlicher Basis wird in hohem Maße von technischen Bedürfnissen bestimmt; da die notwendigen Hilfsmittel vorliegen, ist das Problem im Rahmen der praktischen Erfordernisse reif zur Lösung. Der notwendige Arbeitsaufwand wird natürlich ungeheuer sein. Vom Standpunkt der geistigen und materiellen Ökonomie ist zu hoffen, daß grundsätzlichen Zusammenhängen auch bei der Behandlung von konkreten Aufgaben die gebührende Aufmerksamkeit geschenkt wird, wie das bei Arbeiten mancher älterer Forscher trotz mangelhafter Ausrüstung mit Meßapparaten der Fall war.

Literatur.

- ¹ THORADE, Probleme der Wasserwellen. Hamburg 1931. — ² JEFFREYS, Proc. Roy. Soc. A 107 (1925) (1926). — ³ MOTZFELD, Z. angew. Math. Mech 1937. — ⁴ STANTON MARSHALL and HOUGHTON, Proc. Roy. Soc. A 137 (1937). — ⁵ KEMPF, Trans. Soc. Nav. Arch. Mar. Eng. N. Y. 1936. — ⁶ Weltkongreß für Schifffahrt, Bericht 7, Brüssel 1935. — ⁷ W. PABST, Z. Motorluftschifffahrt 1933. — ⁸ E. MEWES, Jb. Luftfahrtwiss. 1937. — ⁹ G. WEINBLUM, Jb. Schiffbautechn. Ges. 1936. — ¹⁰ G. WEINBLUM, Forsch. u. Fortschr. 1937 — Dtsch. Technik 1937. — ¹¹ V. CORNISH, Ocean waves 1935. — ¹² G. SCHNADEL, Trans. N. E. Coast Inst. Shipb. Mar. Eng. 1938. — ¹³ SCHUMACHER, Jb. Lillenthal-Ges. 1936. — ¹⁴ G. WEISS, Jb. Schiffbautechn. Ges. 1936.

Kurze Originalmitteilungen.

Für die kurzen Originalmitteilungen ist ausschließlich der Verfasser verantwortlich.

Über die Anreicherung von Deuteriumoxyd durch Elektrosmose.

Die Dielektrizitätskonstante von D₂O (80,5) ist kleiner als die von H₂O (82). Andererseits ist die innere Reibung von D₂O (12,6) größer als die von H₂O (10,1). Es muß somit D₂O langsamer als H₂O elektrosmotisch durch ein Diaphragma wandern. Bei der Durchführung einer Elektrosmose eines D₂O/H₂O-Gemisches besteht demnach die Möglichkeit, daß sich D₂O im Anodenraum anreichert. Es wurden deshalb Versuche vorgenommen, um festzustellen, ob eine solche Anreicherung überhaupt stattfindet und dann auch, um den Anreicherungsfaktor einer solchen Trennung zu bestimmen.

Zur Durchführung der Versuche wurde von 2proz. D₂O ausgegangen und dieses mehrfach auf die Hälfte, in einem Versuche auf 1/30 elektrosmotisch eingeengt. Als Diaphragma diente eine poröse Tonzelle von 4 mm Wandstärke, 65 mm Innendurchmesser und 160 mm Höhe. Als Anode wurde ein Magnetitstab verwendet und als Kathodenmaterial Zinkblech. Als Anodenraum war der innere Raum der Tonzelle vorgesehen. Der D₂O-Gehalt der Anodenflüssigkeit wurde jeweils durch Dichtebestimmung mit einem 10-cm-Pyknometer ermittelt. Die Ergebnisse einer Versuchsreihe sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Ausgangswasser		Angereichertes Wasser		Anreicherungsfaktor
Menge ccm	D ₂ O-Gehalt %	Menge ccm	D ₂ O-Gehalt %	
1000	1,87	450	1,95	1,055
435	1,95	245	2,03	1,078
230	2,03	105	2,12	1,057
90	2,12	25	2,23	1,043
830	1,56	25	1,96	1,07

Hieraus ergibt sich im Mittel ein Anreicherungsfaktor von 1,06.

Bei diesem Wert kann es sich natürlich noch nicht um einen endgültigen Wert handeln, sondern nur um die Größenordnung des Anreicherungsfaktors. Dieser wird natürlich von den Versuchsbedingungen abhängig sein, insbesondere von der Art des Diaphragmas. Ferner mußten, wie aus der Tabelle ersichtlich, Unterschiede im D₂O-Gehalt herangezogen werden, die bestimmt als solche vorhanden sind, jedoch zum größten Teil erst in der 3. Stelle liegen und somit nicht ganz sicher sind [vgl. z. B. P. HARTECK, Z. Elektrochem. 44, 3 (1938)].

Hannover, den 24. Februar 1938.

St. v. THYSSEN.