

Über die Ausbreitung der Meereswellen unter der Wirkung des Windes (auf Grund von Messungen im Wattenmeer)

Von Hans Ulrich Roll

(Hierzu Tafel 11 und 12)

Zusammenfassung: 425 Wellenmessungen im Neuwerker Wattenmeer werden mit theoretischen Ergebnissen insbesondere von Sverdrup und Munk verglichen. Hierbei wird festgestellt, daß die Wellengeschwindigkeit im Wattenmeer außer von der Wellenlänge und (in geringem Umfange) von der Wassertiefe auch noch von der Steilheit der Wellen und der Windgeschwindigkeit abhängt, und zwar in dem Sinne, daß wachsende Steilheit eine Verringerung, zunehmende Windgeschwindigkeit jedoch eine Zunahme der Wellengeschwindigkeit zur Folge hat. Ein Vergleich der Meßergebnisse mit dem von Sverdrup und Munk gefundenen Zusammenhang zwischen Steilheit und Wellenalter sowie der theoretischen Abhängigkeit der Wellengrößen von der Laufstrecke ergibt im wesentlichen gute Übereinstimmung.

Investigations on the expansion of sea waves due to the effect of wind, based on measurements in shallow tidal waters, i. e. "Wattenmeer" (Summary). 425 measurements carried out in the shallow tidal waters near the island of Neuwerk in the mouth of the river Elbe are compared with theoretical results especially of Sverdrup and Munk. It is stated that in these shallow waters the wave velocity depends not only on the wave length and (in minor degree) on the depth of the water, but also on the steepness of the waves and on the wind velocity, increasing steepness being combined with decrease of wave velocity, increasing wind velocity however causing increase of wave velocity. On the whole there is a good agreement between the results derived from the author's measurements and the interrelation between the steepness and the age of waves found by Sverdrup and Munk and the theoretical dependency of wave dimensions on the fetch.

Die Erforschung der Ursachen und Gesetze, die die Entstehung und Ausbreitung der Meereswellen bestimmen, hat bislang mit Vorliebe die Verhältnisse des offenen Ozeans als empirische Grundlage benutzt. Dies ist verständlich, gehören doch die Wellen der Weltmeere zu den eindrucksvollsten Erscheinungen auf See und ihre Auswirkungen auf Schiffbau und Schifffahrt sind besonders bedeutsam. Auch sind sie theoretisch einfacher zu behandeln als Flachwasserwellen, bei denen der Einfluß der Wassertiefe komplizierend hinzukommt.

Gegenüber dieser Beschäftigung mit dem Seegang auf den Ozeanen tritt das Studium der Wellenbewegung auf den flachen Randmeeren wie Nord- und Ostsee und den Küstengewässern stark zurück, fast als ob ein Eingehen auf diese minderentwickelten Wellengebilde unserer nächsten Umgebung sich nicht lohne. Nur wenige deutsche Arbeiten (Kossinna [1], Frank [2]) behandeln die Wellen der Flachsee. Sie beschränken sich noch dazu auf Einzelwerte und geben keine umfassende Darstellung und insbesondere keine Verbindung zur Theorie.

Diese Bevorzugung der Tiefwasserwellen bei der Erforschung der Meereswellen ist zwar vom Standpunkt des Nautikers und des reinen Theoretikers aus gesehen verständlich, sie ist jedoch verwunderlich, wenn man die Dinge mit den Augen des praktischen Wissenschaftlers betrachtet, dem es vor allem auf eine möglichst vollständige und einwandfreie Messung der Erscheinung ankommt. Die technischen Schwierigkeiten einer solchen Messung der ozeanischen Wellengrößen sind – wie wir alle wissen – noch so groß, daß sie zur Zeit trotz großen Aufwandes an Material und Personal nicht überwunden werden können und daß auch die Leistung ganzer Forscherleben (Cornish, Graf Larisch) nicht ausreicht, um alle Probleme zu lösen. So geben auch die mit soviel Sorgfalt durchgeführten photogrammetrischen Wellenaufnahmen von Schumacher [3] eine zwar sehr genaue Morphologie der Wellen, aber nur einen – wenn auch sehr wichtigen – Ausschnitt der gesamten Erscheinung.

In gewissem Sinne werden diese meßtechnischen Schwierigkeiten in neuerer Zeit durch die registrierenden Seegangsspiegel überwunden, die sowohl in den USA und England (Seiwell [4], Deacon [5]) als auch in Deutschland (Tomeczak [6]) im flachen Wasser des Küstenvorfeldes eingesetzt werden. Die Verbesserung der Meßbedingungen wird hier erreicht durch Verzicht auf die Tiefwasserwellen. Ihr Vorteil liegt in der fortlaufenden Feinregistrierung der wellenbedingten Druckschwankungen am Meeresboden, aus denen sich Werte der Wellenhöhe und -periode errechnen lassen.

Es bedeutet nur eine konsequente Fortsetzung dieses Weges: Beschränkung auf Flachwasserwellen zwecks Verbesserung der Meßbedingungen, wenn durch den Verfasser dazu übergegangen wurde, die Wellen des Wattenmeeres zu studieren. Dieses Unterfangen mag zunächst Bedenken erregen, da wir uns dabei in Gewässer begeben, in denen die Gezeitenbewegungen eine bestimmende Rolle spielen. Gewiß verändern die Gezeitenströme die Wellenbewegung, doch läßt sich dieser Einfluß eliminieren. Hinderlicher ist schon die dauernde Änderung der Wassertiefe. Sie führt andererseits zwangsläufig dazu, daß auch den kleinsten Wellen Aufmerksamkeit geschenkt wird, die sich nach Abflauen des Wassers auf kleinen zurückbleibenden Tümpeln auszubilden pflegen. Diese sogenannten „Tümpelmessungen“ können als besonders brauchbar angesehen werden, da hier alle die Wellenbewegung bestimmenden Faktoren einschließlich der Laufstrecke leicht überschaubar und bequem der Messung zugänglich sind. Solche Messungen auf kleinen Teichen sind – soweit bekannt – bisher nur von Cornish [7] auf dem „Felsenteich“ in Devon und dem „Runden Teich“ in London durchgeführt worden. Von diesen unterscheiden sich die Tümpelmessungen im Neuwerker Watt durch die Tatsache, daß die Umgebung der Tümpel im Umkreis vieler Kilometer völlig eben und daher eine Störung der Luftströmung durch irgendwelche Hindernisse nicht zu befürchten ist. Zudem ist die „Rauhigkeit“ des Wattbodens, in den diese Tümpel eingelagert sind, von der Größenordnung der „Rauhigkeit“ der Meeresoberfläche, wie durch vertikale Windprofilmessungen festgestellt werden konnte. – Gegenüber den Windkanaluntersuchungen von kleinen Wellen (Stanton [8], Weinblum [9], Wuest [10]) besitzen die Tümpelmessungen im Neuwerker Watt außerdem den Vorteil, daß Dimensionen und Zustand der Luftgrenzschicht den üblichen atmosphärischen Verhältnissen entsprechen, ein Umstand, der, wie aus den Arbeiten von Wuest hervorgeht, von Bedeutung sein kann.

Über die Ergebnisse der gleichzeitig mit den Wellenbeobachtungen durchgeführten Messungen der vertikalen Windgeschwindigkeits- und Temperaturprofile wurde bereits an anderer Stelle [11] berichtet.

Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich nicht allein auf die Feststellung der Eigentümlichkeiten der Wellen im Wattenmeer. Sie verfolgt vielmehr von vornherein das Ziel, die ohne großen Aufwand zu erhaltenden und verhältnismäßig zuverlässigen Wellenmessungen im Wattenmeer in Verbindung zu bringen mit den Wellen der Ozeane, um die auf kleinem Raum gewonnenen Erkenntnisse auszuwerten für die Erklärung der Gesamterscheinung. Wohl mag es zunächst zweifelhaft erscheinen, ob eine solche Deutung und Auswertung der Wellenmessungen im Wattenmeer überhaupt möglich ist. Sie wäre in der Tat nicht durchführbar gewesen, wenn wir nicht dabei auf den neuen Untersuchungen von Sverdrup und Munk [12] hätten fußen können, die unter Zusammenfassung der bisherigen Messungen erstmalig in der Geschichte der Meereswellenforschung eine theoretische Darstellung des Problems bringen, die den praktischen Erfordernissen Rechnung trägt. Es soll in dieser Arbeit vor allem versucht werden, die bisherigen Ergebnisse der Neuwerker Wellenmessungen zusammenzufassen und mit denen von Sverdrup und Munk zu vergleichen. Dabei wird ausschließlich die Ausbreitung der Wellen in Abhängigkeit von Wind, Laufstrecke und Zeit behandelt werden. Die speziellen Untersuchungen über die Entstehung der ersten Wellen sind noch nicht abgeschlossen und sollen später folgen.

Bei den Messungen wurde ich unterstützt durch meine Mitarbeiter, die Herren Ob.Insp. Greiter, Insp. Schilling und Insp. Petri, der auch bei der Auswertung weitgehend mitwirkte. Instrumente und Geräte wurden von der Abt. Wetterinstrumente des Meteorologischen Amtes Hamburg bereitgestellt bzw. entwickelt. Die Durchführung der Messungen wurde wesentlich erleichtert durch Herrn Prof. Dr. Dannmeyer, der die Neuwerker Zweigstelle des Instituts für physikalisch-biologische Lichtforschung in Hamburg als Unterkunft zur Verfügung stellte. Hilfe und Entgegenkommen erfuhren die Untersuchungen ferner von Seiten des Seewasserstraßenamtes Cuxhaven (Baurat Schmidt), des Wasserstraßen- und Hafenamtes Cuxhaven (Baurat Backwinkel), des Leiters des Seenotdienstes Cuxhaven (Kpt. Schumacher) und ihrer nachgeordneten Dienststellen, insbesondere durch die Herren Sumfleth, Rauschenbach und von Hörsten auf Neuwerk. Allen Genannten sei auch an dieser Stelle bestens gedankt.

A. Zur Theorie der Meereswellen. Wie überall in der Physik ist es auch das Ziel einer Theorie der Meereswellen, die Messungen zu Gesetzmäßigkeiten zusammenzufassen, die eine Vorausberechnung gestatten. Von diesem Endziel war die Erforschung der Meereswellen bisher weit entfernt. Es bestand zwar ein umfangreiches Gebäude theoretischer Erkenntnisse, doch war seine mathematische Eleganz hervorstechender als seine praktische Anwendbarkeit. Die Messung selbst war weit zurück und kaum in der Lage, die theoretischen Ergebnisse zu prüfen. Auch fiel der Schwerpunkt des praktischen Interesses häufig nicht mit dem der Theorie zusammen. So entstanden zwangsläufig empirische Formeln, die zum Teil weder untereinander noch mit den theoretischen Ableitungen übereinstimmten.

Erst die Arbeiten von Jeffreys [13] über die Anregung der Meereswellen unter der Wirkung des Winddruckes in Verbindung mit den Messungen von Cornish brachte der praktischen Wellenforschung einen Fortschritt. In neuester Zeit ist nun durch die Untersuchungen von Sverdrup und Munk ein entscheidender Schritt hinsichtlich der Verbindung von Theorie und Praxis der Meereswellen getan worden, wobei die Erfordernisse des Krieges (Landungsoperationen) anregend und fördernd mitgewirkt haben. Es ist hier nicht möglich, auf Einzelheiten dieser Arbeiten einzugehen. Doch sollen einige Begriffe und wesentliche Züge kurz erläutert werden.

1. Sverdrup und Munk behandeln zunächst die Ausbreitung eines winderzeugten Wellenzuges in ein bislang ungestörtes Meeresgebiet und finden dabei, daß die Geschwindigkeit dieses Vordringens im wesentlichen gleich der halben Wellengeschwindigkeit ist. Dies ist wichtig für die Vorausberechnung der Verlagerung von Sturmwellengebieten.

2. Die Energieübertragung Wind–Meereswellen erfolgt bei Sverdrup und Munk sowohl durch Normaldruck als auch durch tangential Schubspannung. Unter diesen Voraussetzungen wird auch dann noch Energie vom Wind auf die Wellen übertragen, wenn die Wellengeschwindigkeit die Windgeschwindigkeit übersteigt. Die Berücksichtigung der tangentialen Schubspannung steht im Gegensatz zu dem Vorgehen von Jeffreys, der nur den Normaldruck als wichtig ansah, befindet sich jedoch in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Neuwerker Windprofilmessungen [11, 14], die auf eine entscheidende Mitwirkung der Tangentialkräfte hindeuten. (Der von Sverdrup und Munk benutzte Widerstandskoeffizient $\gamma = 0.051$ ist allerdings größer als der in Neuwerk für Windgeschwindigkeiten bis 11 m/s gefundene Wert von 0.039 bis 0.035!).

3. Die Ableitungen von Sverdrup und Munk tragen dem Interferenzcharakter des Seeganges – bedingt durch die Anregung eines Spektrums von Wellenperioden – dadurch Rechnung, daß sie sich nicht wie die klassische Theorie auf „konservative“ Wellen beziehen, deren Identität bei der Wanderung erhalten bleibt, sondern auf die „charakteristischen“ (significant) Wellen. Diese sind zunächst rein statistisch definiert als Wellen, die die mittlere Höhe und Periode des höchsten Drittels der Wellen besitzen. Für praktische Bedürfnisse ist es jedoch wichtig zu wissen, daß es annähernd die „charakteristischen“ Wellen sind, die ein Beobachter zu messen pflegt, der die größeren der vorhandenen Wellen beobachtet und die kleineren vernachlässigt. Eine solche „charakteristische“ Welle läßt sich nun nicht mehr über unbegrenzte Zeiten verfolgen, wie wir dies bei „konservativen“ Wellen meist stillschweigend voraussetzen. Sie verschwindet vielmehr nach einiger Zeit, um anderen Platz zu machen. Diese „charakteristischen“ Wellen bestimmen die wesentlichen Züge der Meereswellen, insonderheit sind sie – und nicht die konservativen Wellen – mit folgenden zwei Beobachtungstatsachen in Einklang zu bringen:

Weht ein Wind von konstanter Geschwindigkeit über ein begrenztes Seegebiet, so stellt sich nach genügend langer Zeit ein stationärer Zustand ein, der durch die zeitliche Konstanz der Wellen an dem jeweiligen festen Ort gekennzeichnet ist. Örtlich gesehen sind diese Wellen jedoch unterschiedlich, insbesondere sind sie auf der Leeseite des Seegebietes länger und höher als auf der Luvseite. Dieses Verhalten der Wellen läßt sich ebensowenig mit der Vorstellung konservativer Wellen vereinbaren wie das zweite Beobachtungsergebnis:

Weht ein gleichbleibender Wind über einen unbegrenzten Ozean, so wachsen die Wellen an allen Orten gleichmäßig, wobei die Wellengrößen dieses nicht-stationären Zustandes nur von der Zeit, aber nicht vom Ort abhängen.

4. Für die so definierten „charakteristischen“ Wellen stellen Sverdrup und Munk Energiebetrachtungen an und erhalten für den stationären und den nicht-stationären Zustand je eine Differentialgleichung, in der die Wellengrößen von der Windgeschwindigkeit und der Laufstrecke, bzw. von der Windgeschwindigkeit und der Zeit abhängen.

5. Zur Lösung dieser Differentialgleichung bemühen sich Sverdrup und Munk um eine Beziehung zwischen der Steilheit der Wellen (Wellenhöhe H /Wellenlänge L) und dem „Wellenalter“ (Wellengeschwindigkeit C /Windgeschwindigkeit U). Diese läßt sich nur auf empirischen Wege finden.

6. Mit Hilfe dieser Beziehung $H/L = f(C/U)$ ergeben sich die Wellengrößen H und C als Funktionen der Windgeschwindigkeit U und der Zeit t . Diese Gleichungen werden durch Abhängigkeiten von der Windgeschwindigkeit U und der Laufstrecke F ersetzt, sobald eine Minimalzeit überschritten wird, die zu der jeweiligen Windgeschwindigkeit und Laufstrecke gehört.

7. Sverdrup und Munk haben ferner die Umwandlung des Seeganges in Dünung nach Erlöschen der anfachenden Kraft des Windes behandelt, doch soll an dieser Stelle hierauf nicht eingegangen werden, da das Neuwerker Material solche Wellen kaum enthält.

B. Eigene Messungen. I. Meßort und Meßmethodik. Die Meßstelle befand sich im Wattenmeer etwa 200 m nordwestlich der Insel Neuwerk (Abb. 1). Zweimal am Tage wird dort das Watt für jeweils etwa 7 Stunden überflutet, wobei die Wassertiefe bei normalen Verhältnissen auf etwa 180 cm bei Hochwasser ansteigt. Diese vorgegebenen Versuchsbedingungen besaßen ihre Vor- und Nachteile. Das Trockenfallen des Wattenmeeres bei Niedrigwasser gestattete es einerseits leicht, einen festen Meßstand zu errichten, was für die saubere Durchführung der Messungen recht wesentlich war. Dies wird jeder bestätigen, der genötigt war, Wellenmessungen von einem schwankenden Fahrzeug aus vorzunehmen. Andererseits bedeutete jedoch die gezeitenbedingte zeitliche Änderung der Wassertiefe und der hiermit zusammenhängende Gezeitenstrom eine an sich unerwünschte Komplikation vor allem der Auswertung der Messungen, die jedoch überwunden werden konnte.

Zur Ergänzung dieser Wellenmessungen im Wattenmeer wurden ferner auf kleinen, bei Niedrigwasser auf dem Wattboden zurückbleibenden Tümpeln zahlreiche Wellenmessungen angestellt. Hier war kein störender Gezeitenstrom vorhanden, hier blieb die Wassertiefe zeitlich konstant, auch ließen sich die Laufstrecken der Wellen sauber festlegen. So sind diese sogenannten „Tümpelmessungen“ als besonders wichtig für das Studium der kleinsten Wellen zu betrachten.

Mit primitiven Hilfsmitteln (Maßstäbe, Stoppuhr) wurden gleichzeitig und unabhängig voneinander in 10-minütlichem Zeitabstand gemessen: Wellenrichtung, Wellenhöhe (H), Wellenperiode (T) und Wellengeschwindigkeit (C). Außer diesen Wellengrößen wurden gleichzeitig bestimmt: Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Wassertiefe, Gezeitenstromrichtung und -geschwindigkeit. Hierzu ist im einzelnen zu bemerken:

Die Messung der Wellenhöhe (H) (d. h. der doppelten Wellenamplitude) erfolgte unter Benutzung einer in halbe Dezimeter geteilten Skala am Mast, bzw. bei den Tümpelmessungen an einem eingetauchten Millimetermaßstab. Dieses Verfahren klingt einfach und primitiv, birgt jedoch infolge des grundsätzlichen Schwebungscharakters der Meereswellen manche Probleme in sich. Abb. 2 möge dies verdeutlichen. Die hier gezeigten Wellenregistrierungen wurden mit Hilfe eines von der Abt. J des Meteorologischen Amtes für Nordwestdeutschland (Ob.Insp. Lang) konstruierten Wellenschreibers gewonnen, der die Bewegungen eines kleinen Schwimmers auf einer Trommel aufzeichnet und so eine Darstellung der Wellenhöhe und der Wellenperiode erbringt. Aus den drei Wellenkurven wird deutlich, daß nicht nur – wie bekannt – der Seegang auf den Weltmeeren aus Wellen verschiedener Frequenzen zusammengesetzt ist, sondern daß bereits die kleinsten und jüngsten Wasserwellen als Interferenzen aufgefaßt werden müssen. Angesichts dieser Tatsache und der damit verbundenen starken Schwankungen der Wellenhöhe erscheint es wenig zweckmäßig, von einer über alle Wellen gemittelten mittleren Wellenhöhe zu sprechen. Wir werden daher in Zukunft unter Wellenhöhe jeweils die mittlere Höhe der höheren Wellen verstehen und glauben uns dabei mit der Definition der charakteristischen (significant) Wellen im Sinne von Sverdrup und Munk in Übereinstimmung zu befinden.

Für die Wellenperiode (T) gilt Ähnliches. Sie wurde durch Messung der Zeit bestimmt in der 10 „charakteristische“ Wellen an einem festen Punkt vorbeiliefen. Division durch 10 ergab dann die Periode der charakteristischen Wellen. Die Zeitmessung geschah bis herab zu Perioden von 0,5 sec mit der Stoppuhr. Kleinere Perioden wurden mit Hilfe des Wellenschreibers bestimmt.

Die Wellengeschwindigkeit (C) wurde durch Messung der Zeit ermittelt, die ein „charakteristischer“ Wellenkamm für das Durchlaufen einer vorgegebenen Strecke brauchte. Die hierbei verwendeten Distanzen variierten je nach der Wellengeschwindigkeit zwischen 1 und 10 m. Hierzu waren „Peilstangen“ in den entsprechenden Abständen kreisförmig um den Meßstand herum angeordnet.

Die Wellenlänge (L) ergab sich durch Multiplikation von C und T gemäß $L = CT$. Bei den Tümpelmessungen war es zeitweise möglich, direkte Wellenlängenschätzungen durch Anlegen und Mitführen eines Maßstabes vorzunehmen. Ein ruhiges und sicheres Ablesen ist hier allerdings nicht gegeben. Bei gleichzeitiger Wellenlängenbestimmung gemäß $L = CT$ ergab die Schätzung meist geringere Werte. Die Abweichungen lassen sich wahrscheinlich auf die Einflüsse der Parallaxe beim Vergleich Maßstab–Welle zurückführen. Bei der Bearbeitung wurden im allgemeinen nur die aus Perioden- und Geschwindigkeitsmessungen abgeleiteten Wellenlängenwerte benutzt.

Traten mehrere Wellensysteme gleichzeitig auf, so wurden die zugehörigen Wellengrößen getrennt voneinander bestimmt.

Windrichtung und Windgeschwindigkeit beziehen sich stets auf eine Höhe von 1 m über der ausgeglichenen Meeresoberfläche, die durch Mittelung über Wellenberg und -tal erhalten wurde. (Auf Grund von Windprofilmessungen läßt sich sagen, daß die Windgeschwindigkeit in 1 m Höhe im Mittel etwa 90% ihres Wertes in 8 m Höhe betragen dürfte, welchen Wert Swerdrup und Munk ihrer Bearbeitung zugrunde legten.)

Die Wassertiefe (h) wurde ebenfalls bis zu diesem mittleren Meeresniveau gerechnet.

Gezeitenstromrichtung und -geschwindigkeit wurden aus der Treibrichtung und -geschwindigkeit kleiner Schwimmkörper in der Meeresoberfläche ermittelt. Hierzu dienten wiederum die bei der Besprechung der Wellengeschwindigkeit erwähnten Peilstangen.

Die Wellenlaufstrecke (P) ließ sich bei den Tümpelmessungen leicht feststellen. Auch auf dem Meßstand bereitete die Bestimmung der Laufstrecke für solche Wellen keine Schwierigkeiten, die bei südöstlichen Winden in Lee der Insel Neuwerk entstanden. Die hierbei auftretenden Laufstrecken waren ebenfalls ziemlich kurz (155–730 m je nach Wellenrichtung) und ließen sich daher gut übersehen. Für Wellen, die aus westlichen Richtungen – und dies war durchaus die Regel – den Meßstand erreichten, war die Festlegung der Laufstrecke zunächst recht schwierig, da aus diesem Gebiet keinerlei gleichzeitige Wellenmessungen vorlagen. Für Wellen aus dem Nordwestsektor, der durch die vorgelagerte Insel Scharhörn in etwa 4000 m Entfernung abgeschlossen wird, erschien es indessen plausibel, diese Länge als Laufstrecke anzusetzen, obwohl über die tatsächliche Vorgeschichte dieser Wellen nichts Sicheres bekannt war. Bei Wellen aus südwestlichen und westlichen Richtungen wären dementsprechend Laufstrecken von 40 km und mehr in Betracht gekommen, was auf Grund der gemessenen Wellendaten unwahrscheinlich erschien. Infolgedessen wurden für diese durch keinerlei nahegelegenen Inseln und Küsten begrenzten Wellenherkunftsrichtungen als Arbeitshypothese Laufstrecken angenommen, die jeweils durch die das eigentliche Wattenmeer abschließende Tiefenlinie angenähert gegeben werden. Dieser Annahme liegt die Vorstellung zugrunde, daß bei auflandigen Winden die von der Nordsee herankommenden, langen Wellen im flachen Wattenmeer bald ausgelöscht werden und daß gleichzeitig an der seeseitigen Begrenzung des eigentlichen Wattenmeeres ein neuer Seegang entsteht. Diese verhältnismäßig junge Wellenbewegung war es, die bei Neuwerk gemessen wurde, auch wenn die Wellen ihrer Richtung nach aus der freien Nordsee herzukommen schienen. Die den einzelnen Wellenrichtungen zugehörigen Laufstrecken wurden der Seekarte entnommen. Kleinere Priele wurden hierbei nicht berücksichtigt. Natürlich kann es sich hierbei nur um eine verhältnismäßig rohe, nachträgliche Bestimmung der Wellenlaufstrecke handeln, deren Berechtigung jedoch durch das Ergebnis der Untersuchung erwiesen wird.

Die Gesamtzahl der dieser Bearbeitung zugrundeliegenden Neuwerker Wellenmessungen beträgt 406. Hierin sind 49 Tümpelmessungen einbegriffen. Zeitweilig werden außerdem 19 weitere Tümpelmessungen mit Wellenlängenschätzungen verwendet werden.

II. Aufbereitung der Messungen, abgeleitete Größen, Beispiele einer Meßreihe. Bereits bei der Durchführung der Messungen wurde deutlich, daß die Wellen gegen den Gezeitenstrom langsamer, mit dem Strom jedoch schneller liefen als bei Stauwasser. Auch schienen Unterschiede in der Wellenhöhe aufzutreten. Um diesen Einfluß des Gezeitenstromes zu eliminieren, wurden die Messungen nicht auf ein erdfestes, sondern auf ein „wasserfestes“, d. h. mit dem strömenden Wasser mitbewegtes Koordinatensystem bezogen. Die Projektion der Stromvektoren auf die zugehörigen Wind- bzw. Wellenrichtungen ergab Stromkorrekturen von der Größenordnung $\pm 20-60$ cm/s, die an den Wind- und Wellengeschwindigkeiten angebracht wurden. Aus den stromkorrigierten Wellengeschwindigkeiten ließen sich nunmehr, da die Wellenlängen in beiden Koordinatensystemen gleich sein müssen, stromkorrigierte Wellenperioden berechnen.

In allen folgenden Betrachtungen werden ausschließlich stromkorrigierte Werte verwendet.

Für die Bearbeitung der Wellenmessungen sind außer den erwähnten, unmittelbar gemessenen Größen eine Reihe von Kombinationen dieser Werte von Wichtigkeit, die den Vorteil der Dimensionslosigkeit mit dem einer anschaulichen Bedeutung verbinden. So tritt z. B. das Verhältnis

$$\text{Wellenhöhe/Wellenlänge} = H/L$$

unter dem Namen „Steilheit der Wellen“ in vielen Betrachtungen auf. Hierbei handelt es sich im allgemeinen um eine Zahlengröße zwischen 0.1 und 0.02. Aus Gründen der Anschaulichkeit und des günstiger gelegenen Zahlenbereiches wird in dieser Arbeit die Reziproke Steilheit = L/H Verwendung finden. Ihre Werte liegen im allgemeinen zwischen 10 und 50 und lassen das Verhältnis der beiden Wellengrößen unmittelbar erkennen.

Für die Diskussion des Einflusses der Wassertiefe h auf die Wellenbewegung ist ferner das Verhältnis

$$\text{Wellenlänge/Wassertiefe} = L/h$$

von Bedeutung, da die Wirkung des Meeresbodens erst bei L/h -Werten beginnt, die größer als 2 sind.

An wichtigen abgeleiteten Größen seien schließlich noch genannt:

gF/U^2 als dimensionslose Größe für die Laufstrecke F ,

gH/U^2 als dimensionslose Größe für die Wellenhöhe H ,

C/U als dimensionslose Größe für die Wellengeschwindigkeit C .

C/U wird auch Wellenalter genannt ($g =$ Erdbeschleunigung).

Für alle 425 Wellenmessungen wurden die genannten stromkorrigierten Wellengrößen sowie die abgeleiteten dimensionslosen Zahlen bestimmt und tabelliert. Ein Abdruck dieser vollständigen Tabelle muß wegen Platzmangel zunächst unterbleiben.

Um wenigstens eine anschauliche Vorstellung von den Einzelmessungen zu vermitteln, gibt Abb. 3 eine graphische Darstellung der gemessenen und einiger abgeleiteter Wellengrößen dreier Meßtage. Die vorgegebenen äußeren Bedingungen werden durch die Kurven der Wassertiefe h , der Windgeschwindigkeit U und der Laufstrecke F repräsentiert. Die gemessenen Wellengrößen L , T , C und H sowie die dimensionslosen Zahlen L/h , C/U , L/H spiegeln nun die verschiedenen Einflüsse wider. Bei flüchtiger Betrachtung z. B. der Messungen vom 20. 6. 48 könnte der Eindruck hervorgerufen werden, daß vor allem der Einfluß der Wassertiefe h dominiert. Alle Wellengrößen zeigen nämlich einen der Wassertiefe ähnlichen zeitlichen Gang, d. h. sie nehmen zu Beginn des Beobachtungszeitraumes zu und gegen Ende wieder ab. Die Maxima liegen indessen später als das Hochwasser, hierin scheint sich die Wirkung der am 20. 6. zunehmenden Windgeschwindigkeit kundzutun.

Bei eingehender Beschäftigung mit den Messungen ändert sich dieses Bild jedoch, zumindest was die Zunahme der Wellengrößen zu Anfang der Meßreihe angeht. Eine Wirkung

der Wassertiefe kommt in dem betrachteten Beispiel des 20. 6. 48 schon deshalb nicht in Betracht, weil das Verhältnis L/h unterhalb 2 bleibt. Es muß vielmehr für dieses Anwachsen der Wellen eine Zunahme der Laufstrecke F verantwortlich gemacht werden. Die beim Eintreffen des Wassers am Meßstand auftretenden Wellen haben sicher nicht die ganze, entsprechend der Wellenrichtung zur Verfügung stehende Laufstrecke von 4000 m zurückgelegt, sondern sind „irgendwo dazwischen“ entstanden. Infolgedessen vergeht noch eine gewisse Zeit, in der die Wellengrößen zeitabhängig sind, d. h. auch bei konstanter Windgeschwindigkeit zunehmen, bis die ersten Wellen eintreffen, die die gesamte Laufstrecke von 4000 m durchmessen haben. In unserem Beispiel dürfte die Geschwindigkeit dieser Wellen etwa 200 cm/s betragen. Dies ergäbe unter der Voraussetzung, daß die Ausbreitung der Wellengruppen mit der halben Wellengeschwindigkeit vor sich geht, bei $F = 4000$ m eine Laufzeit von 4000 sec = 67 min. Nach über einer Stunde – vom Eintreffen des Wassers an gerechnet – müßte also das Anwachsen der Wellen aufhören, sofern die Windgeschwindigkeit weiter konstant bliebe. Dieser Zeitpunkt ist in den Wellenkurven durch senkrechte Pfeile markiert. In der Tat läßt sich dort ein gewisses Verhalten in dem Anwachsen der Wellen feststellen. In unserem Beispiel des 20. 6. 48 bleibt nun die Windgeschwindigkeit nicht konstant, sondern nimmt zu, so daß der Einfluß der konstanten Laufstrecke überdeckt wird durch die Wirkung des wachsenden Windes. Da angenommen werden muß, daß die Wellen der Windzunahme nicht trägeheitslos sondern mit einer gewissen Verspätung folgen, wird der im stationären Zustand überschaubare Zusammenhang zwischen den Größen Wind, Laufstrecke und Wellen gestört und es ist daher zu erwarten, daß Abweichungen zwischen Theorie und Messung allein schon durch diesen Umstand auftreten werden, der noch dazu keineswegs eine Ausnahme darstellt, ist doch eine zeitlich konstante Windgeschwindigkeit in unseren Breiten verhältnismäßig selten.

Gegen Ende des Beobachtungszeitraumes beginnt am 20. 6. das Verhältnis L/h wesentlich über 2 hinaus anzuwachsen. Die Wellenbewegung wird also in fühlbarem Maße durch die Reibung am Meeresboden gebremst. Nach der üblichen Vorstellung von der Brandung langer Wellen in seichtem Wasser müßte nun die Wellenperiode konstant bleiben und demzufolge die Wellenlänge $L = CT$ in gleichem Maße wie die Wellengeschwindigkeit abnehmen. Wie ein Blick auf das Diagramm zeigt, wird jedoch gegen Ende der Meßreihe vom 20. 6. die Wellenperiode gleichfalls kleiner und läßt dadurch die Verminderung der Wellenlänge wesentlich stärker vor sich gehen, als es bei einer einfachen Abbremsung in flacher werdendem Wasser nach den bisherigen Erfahrungen der Fall sein müßte. Auch die Abnahme der Wellengeschwindigkeit ist stärker als es einer Abbremsung entspräche. Wir werden somit dazu geführt, die starke Abnahme der Wellenlänge bei fallendem Wasser nicht durch Umwandlung der bisher vorhandenen Wellen infolge Abbremsung am Meeresboden zu erklären, sondern durch das Hervortreten neuer charakteristischer Wellen von geringerer Länge, Periode und Geschwindigkeit als bisher. Die längeren Wellen scheinen plötzlich ausgelöscht und durch kürzere verdrängt zu sein, obwohl die Windgeschwindigkeit dabei eher zunimmt als geringer wird. Wahrscheinlich ist dieses Auftreten kürzerer Wellen durch das Trockenfallen von Sänden zu erklären, die die Laufstrecke von 4000 m wesentlich vermindern können.

Bereits diese kurze Betrachtung einer einzelnen Meßreihe lehrt, wie vielfältig die Vorgänge möglicherweise sein können, die zur Ausbildung der gemessenen Wellen führen. Keine der drei die Wellenbewegung erzeugenden oder beeinflussenden Faktoren, Windgeschwindigkeit, Laufstrecke und Wassertiefe, sind im Wattenmeer hinreichend konstant, um die Ausbildung eines annähernd stationären Zustandes zu ermöglichen. Insbesondere werden diejenigen Messungen schwierig zu deuten sein, die innerhalb der ersten Stunde nach dem Eintreffen des Wassers am Stand bzw. in der letzten Stunde vor dem Trockenfallen gewonnen wurden. Es kommen also für die Diskussion des Einflusses der Laufstrecke in erster Linie die Messungen um die Hochwasserzeit in Betracht.

C. Vergleich zwischen Messung und Theorie. I. Zur Frage des Einflusses der Wassertiefe auf die Wellen im Wattenmeer. Bereits bei der Betrachtung einer einzelnen Meßreihe wurde der Einfluß der Wassertiefe auf die Wellenbewegung im Wattenmeer kurz streift. Hier soll nun grundsätzlich geklärt werden, ob es sich bei den Neuwerker Wellenmessungen um sogenannte Tief- oder Seichtwasserwellen handelt. Entscheidend ist hierbei

das Verhältnis L/h . Nach Laplace gilt nämlich – unter der Voraussetzung $H \ll L$ – für die Wellengeschwindigkeit

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{L}}. \quad (1)$$

Hiernach können wir mit hinreichender Genauigkeit setzen:

$$\text{Für } L/h < 2 \quad C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad \text{Tiefwasserwellen (kein Einfluß des Meeresbodens),}$$

für $L/h > 25$ $C = \sqrt{gh}$ Flachwasserwellen (Wassertiefe = dominierender Faktor). Um zu entscheiden, in welchen Bereich die Wellen des Wattenmeeres fallen, wurde Abb. 4 entworfen, die die prozentuale Verteilung der Messungen auf die Größe L/h darstellt. Hieraus ist zu entnehmen, daß die Neuwerker Wellen weder vollständig zu den Tiefwasserwellen gehören noch eindeutig als Flachwasserwellen bezeichnet werden können. Die Messungen konzentrieren sich um den häufigsten Wert $L/h = 2.5$ und nehmen nach kleineren wie nach größeren L/h -Beträgen rasch ab. Während somit ein Teil der Wellen noch zu dem Bereich der Tiefwasserwellen zählt, fällt eine beträchtliche Anzahl in die Übergangszone zwischen Tief- und Flachwasserwellen. Um eine Vorstellung von den in diesem Gebiet $2 \leq L/h \leq 25$ nach der Theorie auftretenden, prozentualen Abweichungen von den Tiefwasserwerten der Wellenhöhe und -geschwindigkeit zu vermitteln, wurden die Kurven ΔH und ΔC eingetragen. Wir erkennen aus ihnen, daß für $L/h \leq 4$ diese prozentualen Abweichungen bei der Wellenhöhe maximal 7%, bei der Wellengeschwindigkeit maximal 4% betragen. Da andererseits nahezu 82% aller Messungen in diesen Bereich $L/h \leq 4$ fallen, in dem die genannten Abweichungen noch verhältnismäßig gering sind, können wir schließen, daß über 80% der im Neuwerker Wattenmeer gemessenen Wellen mit hinreichender Genauigkeit als Tiefwasserwellen aufgefaßt werden können, die keine wesentliche Beeinflussung (Bremsung und Dämpfung) durch den Meeresboden erfahren. Nur in wenigen Fällen ($< 20\%$) kann eine fühlbare Einwirkung des Wattbodens auf die Wellenbewegung erwartet werden.

II. Zusammenhang zwischen Wellenlänge L und Wellengeschwindigkeit C . Nach dem oben Gesagten müssen wir erwarten, daß in 82% aller Fälle der formelmäßige Zusammenhang zwischen Wellenlänge L und Wellengeschwindigkeit C durch die für tiefes Wasser und flache Wellen ($H \ll L$) gültige Beziehung

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (2)$$

befriedigend dargestellt wird, die auch Sverdrup und Munk ihren Ableitungen zugrunde legen. Da wir Wellenlänge und Wellengeschwindigkeit unabhängig voneinander bestimmten und dabei keine andere Beziehung benutzten als die kinematische Gleichung $L = CT$, sind wir in der Lage, die Formel (2) zu prüfen. Dies ist in Abb. 5 geschehen, in der die Wellengeschwindigkeiten als Funktion der zugehörigen Wellenlängen aufgetragen sind. Der größeren Deutlichkeit halber wurde der Wellenlängenbereich $L \leq 20$ cm noch einmal gesondert in größerem Maßstab dargestellt. Die eingetragene Kurve entspricht der Gleichung (2), wobei zusätzlich noch der für kleine Wellen merkbare Einfluß der Oberflächenspannung berücksichtigt wurde. Die Messungen bestätigen zwar den allgemeinen Verlauf der theoretischen Kurve verhältnismäßig gut, doch liegt das Schwergewicht der Meßpunkte eindeutig unterhalb der Kurve. Die Theorie scheint somit eher die obere Grenze der Meßwerte darzustellen als ihre mittlere Anordnung. Die Wellengeschwindigkeit ist also im Mittel um ein Geringes kleiner, als es die Formel (2) fordert.

Wenn es auch nach dem oben Gesagten wenig Erfolg verspricht, den Einfluß der Wassertiefe für diese Verminderung der Wellengeschwindigkeit verantwortlich zu machen, so wollen wir doch diesen Tatbestand noch einmal prüfen. Zu diesem Zweck wurden in der Abb. 6 die

Werte des Verhältnisses $C/\sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$ als Funktion von L/h aufgetragen, wobei die Kurve den theoretischen Zusammenhang

$$C/\sqrt{\frac{gL}{2\pi}} = \sqrt{\operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{L}}$$

darstellt. (Bei kleinen Wellenlängen wurde in $\sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$ zusätzlich die Kapillarität berücksichtigt.)

Falls das in Abb. 5 festgestellte Defizit der Wellengeschwindigkeit C ausschließlich auf die hemmende Wirkung der Wassertiefe zurückgeführt werden könnte, müßten die – hier in Mittelwerte zusammengefaßten – Meßpunkte nunmehr auf dieser Kurve liegen. Wir sehen, daß dies für $L/h \leq 6$ keineswegs der Fall ist, daß hier vielmehr eine negative Abweichung zwischen 5 und 15% zu bestehen scheint. Es müssen also andere Einflüsse als die Wassertiefe für diese Verminderung der Wellengeschwindigkeit haftbar gemacht werden.

Als solche Faktoren kommen die Steilheit der Wellen L/H und die Windgeschwindigkeit U in Betracht. Hinsichtlich der Steilheit wird im Anschluß an die klassischen Rechnungen von Stokes bisher allgemein angenommen, daß steile Wellen rascher wandern als flache. Der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Wellengeschwindigkeit ist bislang nicht restlos geklärt. Während nach der Kelvinschen Theorie die Wellengeschwindigkeit für eine vorgegebene Wellenlänge bei Windstille am größten sein müßte, um dann bei wachsender Windstärke abzunehmen, ergaben die Versuche von Stanton [8] größere Wellengeschwindigkeiten, als sie bei Windstille nach Gleichung (2) zu erwarten wären. Nach den Windkanalmessungen nimmt somit die Wellengeschwindigkeit bei wachsender Windstärke ebenfalls zu.

Um diese Verhältnisse auf Grund des Neuwerker Materials zu prüfen, wurden die prozentualen Abweichungen ΔC der gemessenen Wellengeschwindigkeit C von der gemäß Laplace (Gleichung (1)) berechneten als Funktion der reziproken Steilheit L/H und der Windgeschwindigkeit U ausgezählt und zu Mittelwerten zusammengefaßt. Das Ergebnis enthält Abb. 7, in der die eingetragenen Zahlen jeweils die Anzahl der Beobachtungen angeben, die der Mittelbildung zugrunde liegen. Aus dieser Darstellung geht zweierlei eindeutig hervor:

1. Die Abweichung der gemessenen Wellengeschwindigkeit von der Laplaceschen Formel (1) ist fast immer negativ und umso größer, je steiler die Wellen sind, d. h. bei einer festen Wellenlänge ist die Wellengeschwindigkeit für steile Wellen geringer als für flache. Wir kommen hierauf noch zurück.
2. Die negative Abweichung wird geringer bei zunehmender Windgeschwindigkeit, d. h. mit wachsender Windstärke wird die Wellengeschwindigkeit für eine vorgegebene Wellenlänge gleichfalls größer. Bei flachen Wellen können hierbei durch große Windgeschwindigkeiten positive Abweichungen von der Laplaceschen Formel erzeugt werden. Dieses Ergebnis befindet sich in qualitativer Übereinstimmung mit Stantons Windkanalmessungen.

Das Meßergebnis zu 1. ist zur Zeit ohne theoretische Deutung. Vielleicht ist die Erklärung in folgender Richtung zu suchen: Die Folgerung aus der Theorie von Stokes, daß steile Wellen schneller wandern als flache von gleicher Länge, bezog sich auf ausgesprochene Tiefwasserwellen ($L/h \ll 2$) und berücksichtigt demgemäß nicht die Wassertiefe. Dieses tut zwar die von uns diskutierte Gleichung (1) von Laplace, doch wurde diese bisher nur für sehr flache Wellen abgeleitet. Ist es nun statthaft, die Ergebnisse von Stokes hinsichtlich der Abhängigkeit der Wellengeschwindigkeit von der Steilheit ohne weiteres auf die Laplaceschen Wellen zu übertragen? Diese Frage müßte erst noch geklärt werden.

Auf der Suche nach ähnlichen Messungen stießen wir auf die von Sverdrup und Munk [15] veröffentlichten Wellengeschwindigkeiten, die – in Abhängigkeit von der Wellenlänge – entlang der Pier der Scripps Institution of Oceanography in La Jolla, Californien, gemessen wurden. Diese Werte ergeben im allgemeinen einen Überschuß der gemessenen Wellengeschwindigkeiten gegenüber den nach der Laplaceschen Formel berechneten, stimmen also mit unserem Ergebnis nicht überein. Allerdings geht aus den Messungen von Sverdrup und

Munk nicht hervor, bei welchen Steilheiten und Windgeschwindigkeiten sie gewonnen wurden. Wenn es sich bei diesen Werten um Messungen handeln sollte, die bei sehr flachen Wellen und großen Windgeschwindigkeiten erhalten wurden, wären die gegensätzlichen Ergebnisse erklärbar. Es sei noch bemerkt, daß die Geschwindigkeitsbereiche bei den californischen und den Neuwerker Messungen verschieden sind. Während die von Sverdrup und Munk veröffentlichten Werte zwischen 4 und 7 m/s liegen, fallen die Neuwerker Wellengeschwindigkeiten durchweg in den Bereich unterhalb 3 m/s. Interessant ist, daß der unterste Meßpunkt in der Darstellung von Sverdrup und Munk, der etwa 4.4 m/s Wellengeschwindigkeit entspricht und somit den Neuwerker Geschwindigkeiten am nächsten kommt, im Gegensatz zu den übrigen Werten eine negative Abweichung von der Laplaceschen Formel ganz im Sinne der Neuwerker Messungen aufweist.

Das Neuwerker Ergebnis, daß die (negative) Abweichung der Wellengeschwindigkeit von der Laplaceschen Formel (1) mit zunehmender Steilheit größer wird, ist ein empirisches Resultat, für welches es meines Wissens zur Zeit noch keine theoretische Erklärung gibt. In der wissenschaftlichen Behandlung der Meereswellen, in der fast stets die Theorie der Empirie voraussetzte, ist dies wohl ein Novum.

III. Beziehung zwischen Steilheit und Wellenalter. Das Ergebnis der Untersuchung von Sverdrup und Munk beruht zum großen Teil auf dem empirischen Zusammenhang zwischen der Steilheit H/L und dem Wellenalter C/U . Da die von diesen beiden Autoren verwendeten Messungen im Bereich kleiner C/U -Werte, d. h. junger Wellen, noch recht gering an Zahl sind und überdies stark streuen, andererseits die Neuwerker Beobachtungen im flachen Wattenmeer vorzugsweise in dieses Intervall fallen, erschien es zweckmäßig, die von Sverdrup und Munk gegebene empirische Beziehung mit den Neuwerker Werten zu vergleichen. Dies ist in Abb. 8 geschehen. Sie enthält die (reziproke) Steilheit L/H in logarithmischem Maßstab als Funktion des Wellenalters C/U . Neben den Werten von Sverdrup und Munk und den Neuwerker Messungen wurden noch Angaben von Schumacher [16] und Hinterthan [17] verwendet. Die Verteilung der eingetragenen Messungen auf die einzelnen Autoren ist aus der Legende ersichtlich.

Von den insgesamt 425 Neuwerker Messungen wurden hierbei 373 = 88% benutzt. 12% der Beobachtungen wurden fortgelassen wegen fehlender Stromkorrekturen für C oder abnorm großer Streuung in Richtung großer L/H -Werte, deren Ursache unklar ist.

Ebenfalls eingetragen wurde die von Sverdrup und Munk abgeleitete funktionelle Beziehung (Kurve).

Das Hervorstechende dieser Darstellung ist zunächst die verhältnismäßig große Streuung der Einzelwerte. Sie läßt die Zusammenfassung der Messungen zu Mittelwerten bzw. ihre Darstellung durch eine Kurve problematisch erscheinen. Wenn man jedoch einen solchen Versuch unternimmt, dürfte es zweckmäßig sein, die von Sverdrup und Munk gegebene Kurve etwa in der Weise abzuändern, wie es in der Abb. 8 durch die gestrichelte Gerade angedeutet ist. Hierbei erhalten wir für kleine C/U -Werte Abweichungen von Sverdrups Darstellung, die sich weder dem Sinne noch der Größe nach durch die auf Seite 8 erwähnten (geringfügigen) Höhenunterschiede in der Windgeschwindigkeitsbestimmung erklären lassen, vielmehr offenbar im Zusammenhang mit unserem vorher diskutierten Ergebnis stehen, daß die Wellengeschwindigkeit mit wachsender Steilheit geringer wird.

Die Messungen der Wellen auf kleinen Tümpeln legen es nahe, eine sehr beträchtliche Zunahme der Steilheit bei den jüngsten Wellen gleich nach ihrer Entstehung anzunehmen, so daß etwa im Bereich $C/U < 0.1$ die L/H -Werte – von großen Beträgen kommend – sich sehr rasch der gestrichelten Geraden nähern. Die bereits von Sverdrup und Munk angenommene Zunahme der Steilheit bei den ersten Wellen würde sich hierbei in einem wesentlich kleineren C/U -Bereich vollziehen.

Interessant ist es, daß – sozusagen als untere Begrenzung der Punktwolke – sich eine Gerade legen ließe, die die Vertikale $C/U = 0$ etwa bei $L/H = 7$ trifft, also bei dem maximalen Wert der Steilheit, der nach Michell überhaupt möglich ist. Vielleicht kommt dieser extremen Geraden – in Anbetracht der großen Streuung der Messungen – mehr physikalische Bedeutung zu als einer mittleren Kurve. Dies würde heißen, daß dem jeweiligen Wellenalter

C/U nur eine maximale Steilheit H/L eindeutig zugeordnet werden kann und daß noch andere Faktoren (Grenzschichtzustand und -dicke, vertikale Temperaturschichtung?) für das Auftreten der beobachteten geringeren Steilheiten verantwortlich gemacht werden müssen.

Die Frage des Zusammenhanges Steilheit/Wellenalter scheint somit noch nicht restlos geklärt zu sein.

IV. Abhängigkeit der Wellengrößen von der Laufstrecke. Hinsichtlich des Einflusses der Laufstrecke erscheint ein Vergleich der Neuwerker Wellenmessungen mit der Theorie von Sverdrup und Munk von vornherein schon aus dem Grunde problematisch, weil, wie wir gesehen haben, die Neuwerker Ergebnisse sowohl hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Wellenlänge und Wellengeschwindigkeit als auch demzufolge in der Beziehung zwischen Steilheit und Wellenalter zwar nicht erheblich aber doch deutlich von den Beziehungen abweichen, die Sverdrup und Munk ihren Ableitungen zugrunde legten. Wenn wir trotzdem eine solche Gegenüberstellung versuchen, so gehen wir dabei von der Überlegung aus, daß bei der sicher beträchtlichen Streuung der Einzelwerte die genannten Abweichungen kaum entscheidend ins Gewicht fallen werden.

Wir kehren noch einmal zu der Abb. 3 zurück, die die zeitliche Folge der Wellenmessungen dreier verschiedener Tage enthält. Bereits bei der Diskussion dieser Meßreihen wurde darauf hingewiesen, daß der Zusammenhang der Wellengrößen mit der gemäß Wellenrichtung zur Verfügung stehenden Laufstrecke von etwa 4000 m erst sichtbar werden kann, wenn die ersten Wellen am Meßstand ankommen, die die gesamte Laufstrecke durchlaufen haben. Diese Zeitpunkte sind in den gemessenen Kurven der Abb. 3 durch senkrechte Pfeile gekennzeichnet. Außerdem sind zusätzlich für die Wellenhöhen H und die Wellengeschwindigkeiten C punktierte Kurven eingetragen worden, die sich aus den zugehörigen Laufstrecken F und Windgeschwindigkeiten U nach der Theorie von Sverdrup und Munk errechnen lassen.

Bei der Wellengeschwindigkeit ist vom Zeitpunkt, der durch den Pfeil markiert ist, an eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Messung und Theorie festzustellen. Dieses Zusammengehen hört im allgemeinen erst auf, wenn bei abnehmender Wassertiefe der Zeitpunkt erreicht wird, an dem die Wellenperiode plötzlich absinkt und demzufolge Wellen auftreten, deren Laufstrecken kürzer als 4000 m sein müssen. In den Kurven der Abb. 3 ist dieser Zeitpunkt, der offenbar eintritt, wenn L/h etwa den Wert 4 erreicht, durch ein liegendes Kreuz gekennzeichnet.

Nur am 26. 6. 48 verursacht die plötzlich zunehmende Windstärke gegen 17¹⁰ Uhr eine erhebliche Abweichung der Theorie von der Messung, die sich durch die Zeitabhängigkeit des Seeganges bei einsetzender Windverstärkung erklären läßt. Dieser Zeitfaktor verschwindet erst dann, wenn die zugehörigen Wellen die volle Laufstrecke F durchlaufen haben. Zur Veranschaulichung dieser Verhältnisse sind am 26. 6. 48 um 17¹⁰ Uhr beginnend, unter der Kennzeichnung t Kurventeilstücke eingetragen worden, die sich rechnerisch ergeben, wenn Wellenhöhe H und Wellengeschwindigkeit C von 0 anfangend bis zu den Werten zunehmen würden, die den erhöhten Windgeschwindigkeiten entsprechen. In Wirklichkeit war jedoch noch Seegang vorhanden, so daß die berechneten Kurven t erst nach etwa 30 min. die gemessenen erreichen.

Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Messung ist bei der Wellenhöhe H nicht so befriedigend wie bei der Wellengeschwindigkeit C .

Außer diesen hier im einzelnen diskutierten Wellenmessungen der Tage 19., 20. und 26. 6. 48 wurden in Abb. 9 alle Werte vereint, deren Laufstrecken einigermaßen zuverlässig erschienen. Es sind dies zunächst die Tümpelmessungen (Laufstrecken 1 bis 150 m) und die am Meßstand gewonnenen Wellenbeobachtungen (Laufstrecken 150–730 m), für die sich die Laufstrecken unmittelbar überblicken ließen. Des weiteren wurden die Messungen herangezogen, die später als eine Stunde nach Eintreffen des Wassers am Stand erhalten worden waren. Hierbei schien es nach dem oben Gesagten einigermaßen sicher zu sein, daß die Wellen wirklich die Laufstrecken (bis 7000 m) zurückgelegt hatten, die sich aus der Ausdehnung des eigentlichen Wattenmeeres ergaben. Im einzelnen stecken hierin natürlich noch beträchtliche und unvermeidbare Unsicherheiten, die sich in der Streuung der Werte kundtun. Zur Vereinfachung wurde nach Sverdrup und Munk eine dimensionslose Darstellung (gH/U^2 und

C/U als Funktionen von gF/U^2) gewählt, wobei ein doppelt-logarithmisches Koordinatensystem nötig war, um den außerordentlich weiten Zahlenbereich zu überbrücken.

Abb. 9 ermöglicht außerdem einen Vergleich dieser ausgewählten Neuwerker Messungen mit den von Sverdrup und Munk verwendeten Werten und ihren theoretischen Kurven. Wir stellen zunächst fest, daß die Neuwerker Messungen eine Bereicherung unserer empirischen Daten über das Stadium der „jungen und allerjüngsten“ Wellen bedeuten, die in der Darstellung von Sverdrup und Munk bisher nur spärlich vertreten waren. Im großen betrachtet kann wohl trotz der Streuung von einer Übereinstimmung zwischen Theorie, Tiefwassermessungen, Windkanalergebnissen und den Neuwerker Flachwasserwerten gesprochen werden und es ist außerordentlich befriedigend, hier Gesetzmäßigkeiten angedeutet zu finden, die sowohl für die kleinsten Wellen von einigen Zentimetern Länge gelten als auch für die Wellengiganten der Ozeane, die 300 m Wellenlänge übersteigen.

Beim Eingehen auf Einzelheiten treten jedoch gewisse Unterschiede zu Tage, die wohl nicht ausschließlich auf Ungenauigkeiten der Messungen zurückgeführt werden dürfen. So liegen z. B. bei kleinen Werten von gF/U^2 die Messungen im wesentlichen unterhalb der theoretischen Kurven. Für diese Abweichungen zwischen Theorie und Messung müssen wahrscheinlich jene Voraussetzungen der Theorie von Sverdrup und Munk verantwortlich gemacht werden, die – wie wir in Abb. 7 und 8 sahen – mit den Ergebnissen der Neuwerker Wellenmessungen nicht vollständig übereinstimmen. Hierauf wird in der folgenden Zusammenfassung noch einmal rückschauend eingegangen.

Ergebnisse. 1. Die Ergebnisse der Neuwerker Wellenmessungen können im großen betrachtet als eine Bestätigung der theoretischen Entwicklungen von Sverdrup und Munk über das Anwachsen der Meereswellen unter dem Einfluß des Windes angesehen werden.

2. Diese summarische Feststellung wurde getroffen, obwohl in folgenden Einzelheiten gewisse Unterschiede bestehen:

a) Sverdrup und Munk legen bei der Berechnung der Energieübertragung Wind- Meereswellen einen Widerstandskoeffizienten $\gamma = 0.051$ zugrunde und beschränken ihre Untersuchungen auf Windgeschwindigkeiten, die größer als 5 m/s sind (Meeresoberfläche „rauh“). Demgegenüber führen die mit den Wellenbeobachtungen verbundenen vertikalen Windprofilmessungen im Bereich 0–11 m/s auf γ -Werte, die zwischen 0.039 und 0.036 liegen und mit wachsender Windgeschwindigkeit langsam abnehmen (Meeresoberfläche „wellig“).

b) Sverdrup und Munk benutzen bei ihren Rechnungen die klassische, für tiefes Wasser gültige Beziehung zwischen Wellengeschwindigkeit und Wellenlänge $C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$. Auch für über 80% der Neuwerker Wellenmessungen müßte entsprechend dem Verhältnis Wellenlänge/Wassertiefe die obige Gleichung zutreffen. Trotzdem ergeben sich negative Abweichungen der Wellengeschwindigkeit von der Größenordnung 5–15%, die mit wachsender Steilheit zunehmen, bei stärkeren Winden jedoch geringer werden, und für die eine theoretische Erklärung noch nicht zur Verfügung steht.

c) Entsprechend diesen Differenzen in der Wellengeschwindigkeit scheint auch der grundlegende Zusammenhang zwischen Steilheit und Wellenalter bei den Neuwerker Messungen im Bereich junger Wellen etwas anders zu verlaufen, als es Sverdrup und Munk annahmen.

d) Diese Diskrepanzen dürften sich auch auf die Abhängigkeit der Wellengrößen von Windgeschwindigkeit, Laufstrecke und Zeit in entsprechender Weise auswirken.

3. Trotz der erwähnten Einschränkungen bedeuten die Untersuchungen von Sverdrup und Munk eine außerordentliche Vertiefung unserer Kenntnisse von den Meereswellen und eine willkommene Grundlage für praktische Anwendungen. Ist es doch nunmehr mit ihrer Hilfe möglich, die Dimensionen des Seeganges zu berechnen, wenn Windgeschwindigkeit, Zeitdauer der Windeinwirkung und Wellenlaufstrecke bekannt sind (vgl. Abb. 10). Da diese Größen sich aus synoptischen Wetterkarten entnehmen und mit einiger Sicherheit auch prognostizieren lassen, wäre die Organisation eines regelmäßigen Seegangsvorhersagedienstes – zumindest für einen verhältnismäßig kleinen und daher leicht überschaubaren Seeraum wie Nord- und Ostsee – nunmehr in greifbare Nähe gerückt und damit eine Einrichtung möglich, deren Nutzen vor allem für die Küstenschifffahrt wohl außer Zweifel steht.

Literatur

1. E. Kossinna: Über Größe und Bewegung von Meereswellen in der Flachsee. Ann. Hydrogr. u. marit. Meteorol. Bd. 63, S. 133, 1935.
2. H. Frank: Über See und Wind. Ann. Hydrogr. u. marit. Meteorol. Bd. 68, S. 272, 1940.
3. A. Schumacher: Stereogrammetrische Wellenaufnahmen. Meteor-Werk Bd. VII, 2. Teil, 1939.
4. H. R. Seiwell: Results of research on surface waves of the western North Atlantic. Pap. Phys. Ocean. Met. Vol. X, No. 4, 1948.
5. G. E. R. Deacon: Ocean waves and swell. Hydr. Review, Vol. XXIII 97, 1946.
6. G. Tomczak: Der Seegangspiegel. Dtsch. Hydrogr. Z. Bd. I, S. 141, 1948.
7. V. Cornish: Ocean waves and kindred geophysical phenomena. London 1934.
8. T. Stanton: The growth of waves on water due to the action of the wind. Proc. Roy. Soc. London A Vol. CXXXVII 283, 1932.
9. G. Weinblum: Seegangsforschung. Naturwissenschaften. 26, 193, 1938.
10. W. Wuest: Über die Entstehung von Wasserwellen durch Wind. Diss. Göttingen. 1941. —
- Beitrag zur Entstehung von Wasserwellen durch Wind. Z. angew. Math. Mech. Bd. 23 239, 1949.
11. U. Roll: Wassernahes Windprofil und Wellen auf dem Wattenmeer. Ann. Meteorol. 1, 139, 1948.
12. H. U. Sverdrup and W. H. Munk: Wind, sea, and swell: Theory of relations for forecasting. U. S. Navy Dep. Hydr. Off. 1947.
13. H. Jeffreys: On the formation of water waves by wind. Proc. Roy. Soc. London A Vol. CVII 189, 1925; Proc. Roy. Soc. London A Vol. CX 241, 1926.
14. U. Roll: Über die Existenz einer laminaren Grenzschicht unmittelbar über der Meeresoberfläche. Ann. Meteorol. 1, 206, 1948.
15. H. U. Sverdrup and W. H. Munk: Theoretical and empirical relations in forecasting breakers and surf. Transact. Am. geophys. Un. Vol. 27, 828, 1946.
16. A. Schumacher: Seegangswerte in H. Seilkopf Maritime Meteorologie (Handbuch der Fliegerwetterkunde Bd. II, Berlin 1939).
17. W. Hintertham: Werft, Reederei, Hafen. 349, 1938.

Dünungen im Atlantischen Ozean

Von Ludwig Schubart und Walter Möckel

(Hierzu Tafel 13 bis 15)

Zusammenfassung. Es wird eine Darstellung des Dünungsvorkommens im Atlantischen Ozean vorgelegt, die sich aus mehrjährigen systematisch durchgeführten Fahrtbeobachtungen zur Untersuchung des Seeverhaltens einer größeren Anzahl Schiffe ergeben hat. Zu diesem Zweck wird das Gebiet des Atlantischen Ozeans in sechs charakteristische Fahrtgebiete unterteilt und für jeden dieser Seeräume die Häufigkeitsverteilung der Dünungsrichtungen und -stärken nach der Douglas-Skala angeführt. Hinsichtlich der Dünungsrichtungen zeigen sich in den einzelnen Fahrtgebieten geographisch und meteorologisch bedingte charakteristische Häufigkeitsverteilungen, aus denen sich allerdings keine für den ganzen Atlantik vorherrschende Richtungstendenz heraushebt. Dagegen weisen die Häufigkeitskurven der Dünungsstärken in allen Fahrtgebieten eine relativ weitgehende Übereinstimmung ihres Verlaufes und der Häufigkeitswerte auf, wobei in allen Fällen der Häufigkeitsschwerpunkt bei den kleinen Dünungsstärken liegt. Damit ergibt sich hinsichtlich der Dünungsstärken für das Gebiet des ganzen Atlantik ein sehr einheitliches Bild.

Swell in the Atlantic Ocean (Summary). Based on systematic observations on the behaviour of a considerable number of ships in a sea way carried out over several years, a representation of the occurrence of swell in the Atlantic is given. The ocean is divided into six characteristic regions for each of which the frequencies of direction and force of swell (according to the Douglas scale) are shown. Regarding the frequency of direction characteristic features due to geographical and meteorological conditions can be recognized in the different regions, whereas no predominant tendency in direction can be found for the Atlantic as a whole. On the other hand the frequency curves of the force of swell in all regions show a considerable conformity, their apexes always coinciding with the minor steps of the scale. Thus for the whole Atlantic Ocean a very uniform distribution of the force of swell is shown to exist.