

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Richter, Karl

I. Die Seegangsverhältnisse in der Nordsee

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtskongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
PIANC Deutschland

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104797>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Richter, Karl (1981): I. Die Seegangsverhältnisse in der Nordsee. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 25. Internationaler Schifffahrtskongreß; Edinburgh, Großbritannien, 10. - 16. Mai 1981. Bonn: PIANC Deutschland. S. 103-110.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Abteilung I

Binnenwasserstraßen und Häfen

Thema 4

Integrierung von See-, Küsten- und Binnenschifffahrt

Teil 1: Die Seegangsverhältnisse in der Nordsee

Teil 2: Die Vereinheitlichung der Schiffszeichen an See-, Küsten- und Binnenwasserstraßen

Teil 3: Linienentwurf und Antrieb von seegehenden Binnenschiffen

Berichtersteller:

Federführung: Prof. Dr.-Ing. H. Heuser, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e. V., Duisburg

Teil 1: Dr.-Ing. K. Richter, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg

Teil 2: Dipl.-Ing. Helmut Kuhlbrodt, Seezeichenversuchsfeld, Koblenz

Teil 3: Ing. (grad.) W. Nussbaum

Dr.-Ing. E. Müller

Dipl.-Ing. G. Luthra

Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg

Zusammenfassung

Das Thema hat viele Aspekte. Der deutsche Beitrag sieht INTEGRIERUNG als die Möglichkeit, mehr als bisher mit demselben Schiff im ungebrochenen Verkehr Güter von Binnenhäfen über die Küstengewässer und die offene See bis in die See- oder Binnenhäfen eines Ziellandes zu befördern.

Dies kann und sollte künftig auch von der Bundesrepublik Deutschland aus nicht nur mit binnengängigen Seeschiffen, sondern mehr und mehr mit seegehenden Binnenschiffen erfolgen. Einige westeuropäische Länder, wie die Niederlande, Belgien, Frankreich, aber auch die Ostseeanrainer DDR und Volksrepublik Polen sowie in großem Maße die UdSSR sind in dieser Richtung vorangegangen und haben wertvolle Erfahrungen sammeln können.

Die besonderen Vorteile seegehender Binnenschiffe liegen z.B. in dem sehr günstigen Verhältnis von Nutzlast zu Eigengewicht, den hervorragenden Fahr- und Manövriereigen-

schaften auch bei hohen Blockkoeffizienten sowie der relativ leicht zu realisierenden Möglichkeiten, bis in kanalisierte Flüsse und Schifffahrtskanäle des Binnenlandes zu gelangen.

Da die Nordsee einerseits als „vor der Haustür“ der westeuropäischen Länder liegendes Seegebiet hierfür besonders in Betracht kommt, und dort andererseits sehr hohe Anforderungen an Schiffe und Besatzung in einem ungebrochenen Verkehr gestellt werden, befaßt sich dieser Beitrag

- 1.) mit Fragen der Seegangsmerkmale im Nordseebereich
- 2.) mit der angestrebten Vereinheitlichung der Fahrwegmarkierungen im See-, Küsten- und Binnenbereich
- 3.) mit experimentellen Entwicklungsarbeiten zur Optimierung des Linienentwurfs und des Antriebs von großen seegehenden Binnenschiffen.

Zu 1.)

In der Nordsee sind die Seegangsverhältnisse besonders kompliziert, weil eine Vielzahl von Einflußfaktoren bei der Entstehung und Ausbreitung des Seegangs zusammenwirken: Die Form der Windfelder ist durch den vielgestaltigen Verlauf der Küstenlinien bestimmt. Das Wetter ist durch den häufigen Durchgang von Fronten charakterisiert, verbunden mit sprunghaften Änderungen des Windes. Von entscheidendem Einfluß auf die Ausbreitung der Wellen ist in der Nordsee die begrenzte Wassertiefe. Dabei sind nicht nur die topographischen Gegebenheiten, sondern auch die Bodenbeschaffenheit von Wichtigkeit. Hier ist der Einfluß des wechselnden Wasserstandes durch Gezeiten und Sturmfluten zu berücksichtigen. Außerdem kann der Seegang von Strömungen beeinflusst werden.

Die Möglichkeit der Berechnung und Vorhersage des Seegangs der Nordsee würde eine wesentliche Hilfe bei der Vorbereitung und Durchführung des Einsatzes von seegehenden Binnenschiffen auf der Nordsee sein.

Die während der JONSWAP-Experimente seit 1968 gewonnenen Erkenntnisse erlauben es, zunächst für tiefes Wasser eine Berechnung der Seegangsdaten durchzuführen, wenn wichtige Randbedingungen wie Richtung, Winddauer und Streichlänge des Windes bekannt sind.

Das Verfahren ist auch für sich schnell ändernde Windfelder geeignet, wenn die notwendige Unterscheidung zwischen dem Dünungs- und dem Windseeanteil berücksichtigt wird.

In der NORSWAM (North Sea Wave Model)-Gruppe, einem Zusammenschluß von Wissenschaftlern der Nordsee-Anliegerstaaten, wurde auf der Grundlage der JONSWAP-Ergebnisse ein numerisches kombiniertes Windsee-Dünungsmodell entwickelt, das in der Nordsee (Tiefwasserverhältnisse vorausgesetzt) die Seegangsfelder aus beliebigen Windfeldern zu berechnen gestattet.

Z.Zt. wird an einer Erweiterung des JONSWAP-Verfahrens auf die Flachwassergetriebe der Nordsee gearbeitet.

Wegen der Veränderung in Wellenform und Dämpfungseinflüssen bei Übergang auf Flach-

wasser gestalten sich diese Forschungsarbeiten besonders schwierig. Grundlagen für das erweiterte Verfahren werden 1981 vorliegen.

Zu 2.)

Schiffahrtszeichen, wie Tonnen, Baken und Leuchtfeuer, stehen seit altersher im Dienste der Schifffahrt und bieten eine wesentliche Gewähr für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs. Die Art und Weise, in der Schiffahrtszeichen gesetzt werden, hat sich in den einzelnen Stomgebieten und Küstengewässern unterschiedlich entwickelt. Im Hinblick auf die internationale Verflechtung der Verkehrsbeziehungen wird seit langem angestrebt, die einzelnen Bezeichnungen zu vereinheitlichen. Die Bemühungen hierzu werden aufgezeigt, die sich daraus ergebenden Bezeichnungssysteme für See- und Küstengewässer einerseits und für die europäischen Binnengewässer andererseits werden vorgestellt und Überlegungen zu einer weiteren Anpassung der Systeme angesprochen.

Zu 3.)

Um den kostensteigernden Frachturnschlag in den Mündungshäfen der europäischen Flüsse zu vermeiden, kommen schon seit vielen Jahren Schiffe im Übergangsverkehr Binnengewässer/See zum Einsatz. Die Forderung nach Optimierung und Rationalisierung dieser Art der Güterbeförderung war Teil einer Studie des Forschungszentrums des Deutschen Schiffbaus mit dem Thema „Technologische Entwicklungslinien der Transportsysteme zu Wasser“, die im Auftrage des Bundesministers für Forschung und Technologie erstellt wurde.

Der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg, wurde die Aufgabe übertragen, aus den Erkenntnissen der Flachwasser-Hydrodynamik heraus neuartige Schiffsförmungen und deren Antriebe zu entwickeln, die für die Fahrt in mäßigem Seegang geeignet sind.

Selbstverständlich sollten diese Fahrzeuge im Glattwasser mindestens die gleichen günstigen Fahreigenschaften und transportbezogene Kraftstoffverbräuche erzielen wie herkömmliche Binnenschiffe. Dazu gehört auch die Forderung nach wirtschaftlichem Einsatz im sog. Motorgüterschiff-Schubverband.

Basierend auf vorhandenen, bewährten Binnenschiffstypen wurden durch Änderungen der Schiffslinien im Vor- und Achterschiff sowie der Propelleranordnung seegehende Fahrzeuge entwickelt, die im Modellversuch in regelmäßigen Wellen auf ihre Seefähigkeit getestet worden sind. Der Verkehr auf Binnenwasserstraßen ist integriert in bestehende Systeme möglich, die Fahrt über See kann, je nach den Erfordernissen, im Schub- oder Schleppverband durchgeführt werden.

Auf die Verwendung von Propellerdüsen sollte wegen des höheren Nutzsches des Antriebsorgans bei gleicher Wellenleistung auch für die Fahrt im kleinen bis mittleren Seegang nicht verzichtet werden. Im Glattwasser können die Schubgewinne mit modernen Düsenformen gegenüber düsenlosen Propellern je nach Wassertiefe, Fahrgeschwindigkeit und Leistungsbelastung der Propellerfläche bis über 30 % betragen. Bei seegehenden

Fahrzeugen müssen möglicherweise zur Verminderung von Slamming-Effekten abweichende Profil- und Umrißformen der Düsen gewählt werden. Dennoch verbleiben wesentliche Vorteile im Vergleich zum düsenlosen Schiff, die sich sowohl in der Wirtschaftlichkeit als auch in der gleichmäßigeren Leistungsübertragung an das Wasser bei Seegang manifestieren.

Teil 1

Die Seegangsverhältnisse in der Nordsee

1.1 Einleitung

Die besonderen Naturgegebenheiten sind die Ursache dafür, daß unsere Kenntnisse über die Seegangsverhältnisse in der Nordsee äußerst unzureichend sind. Dieser Mangel wurde besonders deutlich, nachdem in den letzten Jahren die Off-Shore Aktivitäten in der Nordsee sprunghaft angestiegen sind. Es fehlen insbesondere Langzeitstatistiken des Seegangs als Bemessungsgrundlage für die Konstruktion von Bauwerken in See. In Schifffahrt und Schiffbau müssen Reeder und Konstrukteure neuen Risiken begegnen, die einerseits durch den Einsatz sehr großer Schiffe in den flachen Küstengewässern, andererseits durch die Ausdehnung des Fahrtbereichs von seegangsempfindlichen Binnenschiffen in küstennahe Seegebiete erwachsen. Diese Risiken werden durch den zunehmenden Anteil von gefährlichen chemischen Ladungen erhöht. Eine bessere Kenntnis der Seegangsverhältnisse und Vorhersage von gefährlichen Seegangszuständen könnte diese Risiken vermindern.

Leider gibt es nur wenige Stationen in der Nordsee, denen längere Beobachtungsreihen des Seegangs vorliegen. Längere lückenlose Meßreihen existieren überhaupt nicht. Deshalb gibt es ein wachsendes Interesse an sog. „Hindcasting“-Verfahren, die mit Hilfe der für die Nordsee gut dokumentierten und archivierten historischen Winddaten und einem verlässlichen Seegangsberechnungsverfahren Langzeitstatistiken des Seegangs für jeden Ort in der Nordsee rekonstruieren lassen.

Während der letzten Jahrzehnte ist es gelungen, für den Tiefwasserseegang ein verlässliches Berechnungs- und Vorhersageverfahren zu entwickeln. Für den Flachwasserseegang und damit für die Nordsee ist ein solches Verfahren in Entwicklung, die Fertigstellung steht noch aus.

1.2 Seegangsbeobachtungen und -messungen

Die umfangreichsten *Sammlungen von Wellendaten* finden sich bei den nationalen Wetterdiensten, so auch beim Seewetteramt Hamburg. Es handelt sich um Schätzungen der Wellenhöhe, der Wellenperiode und Laufrichtung. Die Beobachtungen werden regelmäßig auf den Feuerschiffen, auf speziellen eingerichteten Bordwetterwarten und von anderen fahrenden Schiffen durchgeführt. Beim Seewetteramt Hamburg sind diese Daten auf Magnetband gespeichert. Mit einem Auswerteprogramm können auf Anforderung für jedes ausgewählte Seegebiet, z.B. Jahres- und Monatsmittelwerte für die mittlere Wellenhöhe und Periode ausgegeben werden.

Die fast lückenlosen Beobachtungsreihen der deutschen Feuerschiffe „Elbe 1“ und „Weser“ stellen einen besonders wertvollen Datensatz dar, weil sich aus ihm nicht nur Angaben über relative Häufigkeiten des Auftretens gewisser Seegangszustände gewinnen lassen, sondern auch Angaben, wie lange ein solcher Zustand andauert.

Leider gibt es solche Datensätze nur für wenige Positionen der Nordsee. Wegen der Fülle der in der Einleitung genannten Einflußfaktoren sind die Ergebnisse von diesen Einzelstationen nicht ohne zusätzliche Kenntnisse auf andere Gebiete der Nordsee übertragbar. Hinzu kommen die Schätzfehler der verschiedenen Beobachter. Die Erfahrung zeigt, daß hohe Wellen meist zu niedrig geschätzt werden. Dadurch kommen systematische Fehler in die Beobachtungen und daraus abgeleitete Statistiken.

Um die letztgenannten Fehler auszuschalten, wurden im Nordseebereich umfangreiche *Meßprogramme* durchgeführt. Im deutschen Küstenbereich wurde in der Eidermündung, bei Westerland und Wangerooge, in der Piep- und der Elbmündung gemessen („Meereskundliche Beobachtungen und Ergebnisse“, DHI). Weitere Untersuchungen s. Lit. [1], [20]

Das Ziel der genannten ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen ist meist eine phänomenologische Beschreibung der Naturvorgänge und ihre Darstellung in empirischen Formeln. Da viele der möglichen Einflußfaktoren nicht berücksichtigt werden, z.B. die Wellenhöhe als Funktion des lokalen Windes allein betrachtet wird, fehlt häufig eine Erklärung für die starke Streuung der Meßwerte.

Die im „Sonderforschungsbereich 94“ der Universität Hamburg zusammenarbeitenden Gruppen der Universität Hamburg, des Max-Planck-Instituts für Meteorologie und des DHI versuchen, das Problem der Seegangsberechnung und -vorhersage auf anderem Wege zu lösen:

Durch sorgfältig geplante Experimente unter definierten Bedingungen sollen die einzelnen Einflußfaktoren z.B. des Windes und des Meeresbodens möglichst isoliert untersucht und die den Vorgängen zugrunde liegenden physikalischen Gesetze gefunden werden. Die Gesetze werden dann zu komplexen mathematischen Modellen zur Berechnung des Seegangs zusammengesetzt, wobei alle wichtigen Einflußfaktoren kontrollierbar berücksichtigt werden. Ein solches Seegangsberechnungsverfahren wird nach Eingabe eines vorhergesagten Windfeldes zum Vorhersageverfahren für die Seegangsverhältnisse an jedem Ort der Nordsee.

Im Meßfeld vor der Insel Sylt fanden seit 1968 mehrere Großexperimente mit starker internationaler Beteiligung statt. Über die Ergebnisse dieser JONSWAP-Experimente (JOINT NORTH SEA WAVE PROJECT) wird im folgenden kurz berichtet.

1.3 Tief- und Flachwasser, Dünung und Windsee

Abb. 1 zeigt ein Ergebnis der JONSWAP-Experimente [3]. Dargestellt sind Seegangsspektren, die gleichzeitig in den angegebenen Entfernungen von der Insel Sylt gemessen wurden. Der Wind war exakt ablandig und konstant, d.h. die Windstreichlänge (Fetch) genau bekannt. Man beobachtet zwei Seegangssysteme: eine niederfrequente schmalbandige Dünung bei 0,1 Hz und eine sich über einen breiten Frequenzbereich erstrecken-

de Windsee. Die Windsee läuft in Richtung des Windes, die Dünung hingegen in entgegengesetzter Richtung auf die Küste zu.

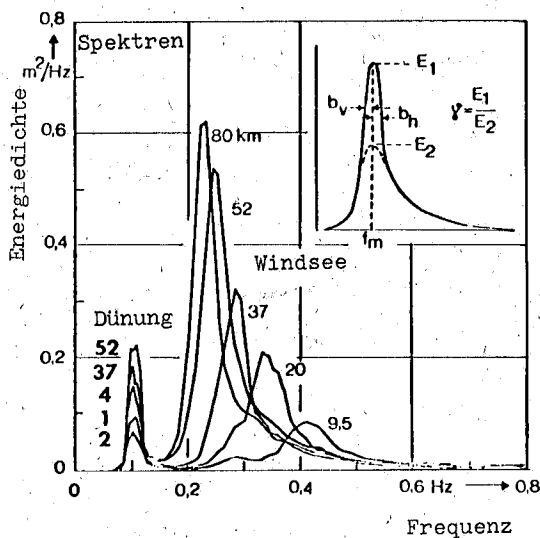


Abb. 1: Seegangsspektren vor der Insel Sylt

Die Energie, bzw. Höhe der Dünungswellen nimmt mit Annäherung an die Küste stetig ab. Ursache ist die von 45 m auf 6 m abnehmende Wassertiefe. Durch Wechselwirkung mit dem Meeresboden verlieren die Wellen Energie. Dieser Effekt wird spürbar, wenn die *Wassertiefe* d ca. $1/4$ der *Wellenlänge* L der einlaufenden Wellen erreicht. Dieser Grenzwert ist im Fall der 10 s-Dünung bei 40 m Wassertiefe erreicht. In Sturmlagen werden in der Nordsee Wellenperioden bis zu 16 s erzeugt; aus dem Nordatlantik können Dünungen von 20 s einlaufen. Die zugehörigen Grenztiefen betragen 100 m bzw. 250 m, d.h. daß für Sturmlagen bezüglich des Seegangs fast die gesamte Nordsee als Flachwassermeer angesehen werden muß. Andererseits entwickeln sich die Windseewellen bei mäßigen Winden – wie z.B. in Abb. 1 – selbst in Küstengewässern noch unbeeinflusst vom Meeresboden (d/L ist hier für alle Komponenten des Spektrums größer 0,25).

Im Verhalten von Windsee und Dünung gibt es einen weiteren wichtigen Unterschied. Abb. 1 zeigt, daß die Maxima der Seegangsspektren (Peaks) für die Dünung bei derselben Frequenz liegen, während sie sich bei der Windsee mit zunehmender Entwicklung zu kürzeren Frequenzen verschieben. Ursache ist, daß die Windsee vom Wind angefacht wird, während sich die Dünung unbeeinflusst vom Wind ausbreitet. Eine Wellenkomponente der Frequenz f wird so lange anwachsen, wie ihre Phasengeschwindigkeit c geringer als die Windgeschwindigkeit U ist. Aus der Dispersionsrelation $c = L \cdot f = \sqrt{gL/2\pi}$ (Tiefwasser) und $U = c$ ergibt sich folgende *Grenzbedingung zwischen Dünung und Windsee*:

In Abb. 1 liegt f_{gr} zwischen Windsee und Dünung. Im Fall einer plötzlichen Windabnahme würde f_{gr} nach rechts rücken und alle diejenigen Komponenten des Windseespektrums links von der neuen Grenzfrequenz müßten als Dünung angesehen werden. Da sie anderen Gesetzen folgen als die restliche Windsee, muß dieser Unterschied auch in den Berechnungsverfahren berücksichtigt werden.

Im allgemeinen werden nur langwellige, langkämmige und sinusförmige Wellen als Dünung bezeichnet. Andererseits unterscheiden selbst erfahrene Beobachter in Sturmseen zwischen Windsee und Dünung, obwohl es sich um eine voll in der Entwicklung befindliche Windsee handelt. Diese Fehler vermindern den Wert des bereits angeführten Beobachtungsmaterials über Seegang und vieler Messungen, die komplexen Seegang durch wenige charakteristische Parameter wie z.B. mittlere Wellenhöhe und Periode beschreiben.

Berechnung des Seegangs für Tiefwasser

Im Fall homogener Windfelder mit definiertem Fetch läßt sich die Entwicklung der Windsee auf einfache Weise berechnen. In Abb. 1 ist die Form der Spektren einheitlich und läßt sich mit einer einzigen Formel darstellen:

$$f_{gr} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{g}{u}$$

f_m = Peakfrequenz; a = sog. Phillips-Konstante; γ = Peak-Überhöhungsfaktor; $b = b_v$ für $f \leq f_m$ und b_h für $f \geq f_m$ · Peak-Breiten (s. rechte obere Ecke Abb. 1).

Dieses „JONSWAP-Spektrum“ geht für $\gamma = 1$; $a = 0,0031$ und $f_m^{PM} = 0,14 \frac{g}{U}$ in das flachere „Pierson-Moskowitz-Spektrum“ über.

Im Fall der hier beschriebenen einfachen Windfelder können $\gamma = 3,2$, $b_v = 0,07$ und $b_h = 0,09$ als konstant angenommen werden. Die für das Wellenfeld charakteristischen Parameter sind aus Dimensionsgründen einzig eine Funktion des sog. dimensionslosen Fetches $\tilde{x} = gx/U^2$ (g = Erdbeschleunigung, x = Fetch in m, U = Windgeschwindigkeit in m/s). Feld- und Laboratoriumsmessungen haben diese Annahme über einen breiten Fetchbereich ($10^{-1} \leq \tilde{x} \leq 10^4$) bestätigt [1].

Selbstverständlich erreichen die Wellen den in Abb. 1 gezeigten Zustand erst, wenn alle Komponenten des Spektrums genügend Zeit hatten, den gesamten Fetch mit der zugehörigen Gruppengeschwindigkeit $\tilde{v} = c/2$ ($c = \sqrt{gL/2\pi}$) zu durchlaufen. Ist das nicht der Fall, z.B. weil der Wind erst vor kurzer Zeit eingesetzt hat, sind die Spektren nicht durch den Fetch, sondern durch die Winddauer t (in s) bzw. durch die dimensionslose Größe $\tilde{t} = gt/U$ begrenzt.

Die JONSWAP Untersuchungen ergeben folgende Zusammenhänge:

Fetchbegrenzter Seegang

$$\tilde{f}_m = 2.84 \tilde{x}^{-0.3}$$

$$\alpha = 0.029 \tilde{f}_m^{2/3}$$

$$\tilde{H} = 1.65 \cdot 10^{-3} \tilde{x}^{1/2}$$

Dauerbegrenzter Seegang

$$\tilde{f}_m = 16.8 \tilde{t}^{-3/7}$$

$$\alpha = 0.028 \tilde{f}_m^{2/3}$$

$$\tilde{H} = 8.46 \cdot 10^{-5} \tilde{t}^{5/7}$$

wobei die signifikante Wellenhöhe $H = H_{1/3}$ ein Maß für die Gesamtenergie des Seegangs ist. ($H = 4 \sqrt{\int E(f) \cdot df}$ und $\tilde{H} = gH/U^2$, ebenfalls $\tilde{T} = 1/\tilde{f}_m = gT/U$).

In Abb. 2 sind die Zusammenhänge graphisch dargestellt.

Beispiel: $gx/U^2 = 5 \cdot 10^3$, $gH/U^2 = 0,117$, $gT/U = 4,53$, $gt/U = 2,48 \cdot 10^4$.

Legt man einen Wind von 20 m/s zugrunde, so entspricht das einem Mindestfetch von 204 km. Die signifikante Wellenhöhe erreicht einen Wert von 4,8 m, die Peakperiode 9,2 s vorausgesetzt, daß der Wind stetig über 14 Stunden geweht hat.

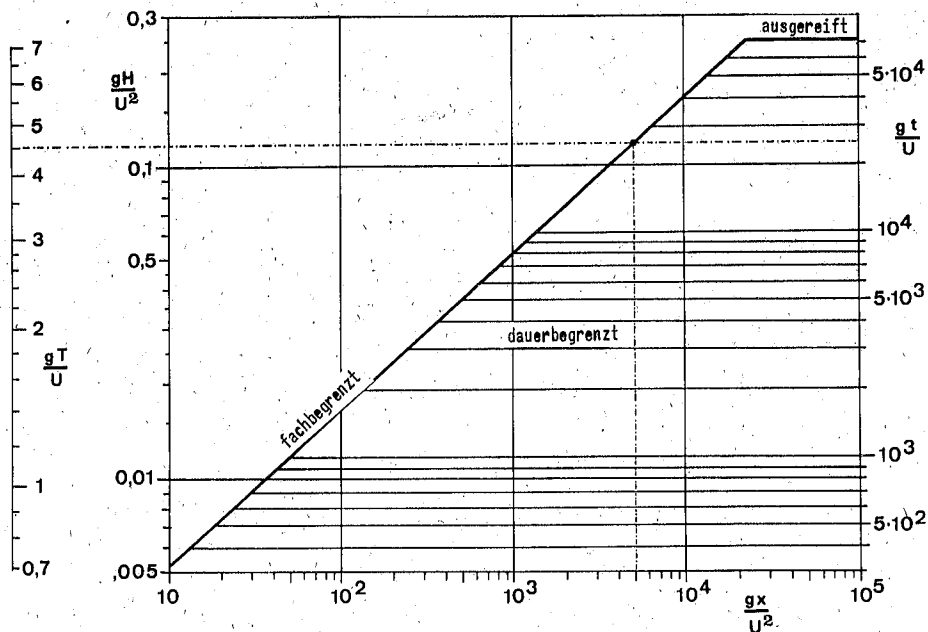


Abb. 2: Dimensionslose Darstellung von fetch- und dauerbegrenzttem Windseegang (Tiefwasser)

Die sog. *ausgereifte Windsee*, bei der das Spektrum die Pierson-Moskowitz-Form annimmt, wird bei $\tilde{f}_m^{PM} = 0,14$ erreicht. Dann ist $\tilde{x}^{PM} = 2,28 \cdot 10^4$ und $\tilde{t}^{PM} = 7,1 \cdot 10^4$. Dieser Zustand würde z.B. bei einem Fetch von 2000 km und einer Windgeschwindigkeit von 30 m/s erst nach 2 – 3 Tagen erreicht. Da sich so große Windfelder selten über eine solche Zeitspanne halten, ist der Übergang zur ausgereiften Windsee durch Messungen nur unzureichend belegt. In den meisten in der Nordsee auftretenden Wettersituationen haben die Windsee-Spektren die (spitze) JONSWAP-Form, solange sie nicht durch Bodeneinflüsse verformt werden.

Eines der wesentlichen Ergebnisse der JONSWAP-Experimente ist, daß man Seegangs-entwicklung nicht nur mit den passenden Formeln beschrieben hat, sondern auch versteht, weshalb der Windseegang das von Dünungswellen abweichende Verhalten der cha-

rakteristischen Verlagerung des Peaks (s. Abb. 1) zeigt und stets die JONSWAP-Spektralform annimmt. Deshalb kann dieses Verhalten auch auf streng physikalischer Grundlage berechnet werden.

Die Verlagerung des Peaks während der Entwicklung des Seegangs geschieht durch Umverteilung der Energie innerhalb des Spektrums. Tatsächlich laufen die Wellenkomponenten verschiedener Frequenz, die das Spektrum aufbauen, nicht unbeeinflusst nebeneinander her – wie es bei Dünungen der Fall ist – sondern tauschen untereinander Energie aus. Physikalisch handelt es sich um sog. nichtlineare, schwache Wellen-Wellen-Wechselwirkung, für die es eine exakte Theorie gibt.

Der beschriebene Austauschmechanismus funktioniert nur, wenn das Spektrum die spitze JONSWAP-Form hat. In einem rückgekoppelten Regelvorgang zwischen Energiezufuhr aus dem Wind und Umverteilung durch die nichtlineare Wechselwirkung wird dafür gesorgt, daß genau diese Form angenommen und ein bestimmter Energieinhalt des Spektrums erreicht wird.

Der Umverteilungsprozeß benötigt eine gewisse Zeit (abhängig von der Wellenlänge der beteiligten Komponenten ca. 1/2 – 3 Stunden). Ändert sich der Wind im Vergleich mit diesen Zeitangaben nur langsam, kann die spektrale Form der Windsee bei bekannten Fetchverhältnissen berechnet werden: Man bestimmt a und f_m und setzt sie zusammen mit den konstanten Werten von γ , b_v und b_h in die Formel für das JONSWAP-Spektrum ein.

Im Fall sich *schnell ändernder Windfelder*, wie sie leider häufig in der Nordsee beim Durchgang von Fronten auftreten, muß man zeitliche und räumliche Struktur des gesamten Windfeldes berücksichtigen und die in Kapitel 3 eingeführte Unterscheidung zwischen dem Dünungs- und Windseeteil des Spektrums machen. Das führt zu numerischen Verfahren, die auf der Integration der sog. Energiebilanzgleichung beruhen:

Die Gleichung beschreibt, wie sich das Seegangsspektrum $F(f, \Theta)$ zeitlich und räumlich unter der Einwirkung äußerer Kräfte, die durch die Quellfunktion S beschrieben werden, entwickelt. v ist die Gruppengeschwindigkeit einer Wellenkomponente mit der Frequenz f und der Laufrichtung Θ . Für eine Windsee kann man annehmen, daß die Wellenkomponenten bevorzugt in Windrichtung Θ_0 laufen (z.B. $F(f, \Theta) = E(f) \cdot 2 \cos^2(\Theta - \Theta_0)$).

Die Quellfunktion S beschreibt alle Prozesse, die dem Seegang Energie zuführen oder entziehen, bzw. die Energie nur umverteilen:

$$S = S_{inp} + S_{diss} + S_{nl}$$

Für die Entwicklung der Windsee ist der Prozeß der nichtlinearen-Wechselwirkung S_{nl} der beherrschende Term in der Energiebilanzgleichung. Dissipative Prozesse S_{diss} spielen eine untergeordnete Rolle und die Energiezufuhr durch den Wind S_{inp} läßt sich in einfacher Weise berücksichtigen.

Im Gegensatz zur Windsee ist die Quellfunktion für Dünungen $S = 0$.

Es gibt keine Energiezufuhr durch den Wind, und die Wellenkomponenten breiten sich

ohne Austausch von Energie aus. Sie folgen den klassischen Gesetzen der linearen Wellentheorie. Ihr Verhalten ist deshalb einfach zu berechnen.

In der NORSWAM (North Sea Wave Model)-Gruppe, einem Zusammenschluß von Wissenschaftlern der Nordsee-Anliegerstaaten, wurde auf der Grundlage der JONSWAP-Ergebnisse ein numerisches kombiniertes Windsee-Dünungsmodell entwickelt, das in der Nordsee (Tiefwasserverhältnisse vorausgesetzt) die Seegangsfelder aus beliebigen Windfeldern zu berechnen gestattet [4].

Abb. 3 soll die Leistungsfähigkeit des Modells für ein kompliziertes Windfeld mit zwei Windsprüngen verursacht durch zwei Fronten demonstrieren. Die Station 9 (37 km vor der Insel Sylt) wurde herausgegriffen und gemessene und berechnete Wellenparameter (f_m , $H_{1/3}$) und Spektren verglichen [5].

Die bisher wichtigste Anwendung des Berechnungsverfahrens erfolgte mit dem Ziel langfristige Extremwertanalysen des Seegang

Die bisher wichtigste Anwendung des Berechnungsverfahrens erfolgte mit dem Ziel langfristige *Extremwertanalysen des Seegangs für die nördliche Nordsee* zu erarbeiten. Dazu wurden 42 repräsentative Sturmlagen aus den Jahren 1966 – 1976 ausgewählt und im Hincast-Verfahren die zugehörigen Wellendaten berechnet. Die Analyse ergab – für einen 50-Jahreszeitraum extrapoliert – Wellenhöhen von über 30 m [6]. Für die Umgebung von Helgoland wurden übrigens auf der Grundlage von Beobachtungen Design-Wellen von ca. 24 m Höhe abgeschätzt.

Eine weitere Anwendung war die Rekonstruktion der Seegangsverhältnisse zum Zeitpunkt des Untergangs des deutschen Lash-Schiffes „München“ und während des Fastnet-Rennens 1979.

1.4 Berechnung des Seegangs für Flachwasser

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt gibt es keine den Tiefwasserverfahren vergleichbare Flachwasser-Seegangsberechnungsverfahren. Zwar existiert ein Verfahren, das vom UK Meteorological Office benutzt wird [7]. Es ist aber in seiner Anwendbarkeit auf den Nord-Atlantik und die Gewässer um England beschränkt.

Im Sonderforschungsbereich 94, Hamburg, arbeitet man an einer Erweiterung des Tiefwasser-Seegangsverfahrens auf die Flachwassergebiete der Nordsee. Zunächst wird die Bodentopographie berücksichtigt, um Refraktion und Shoaling (Aufsteilen) der Wellen zu berechnen. Die Gesetze dafür sind bekannt und stellen eine einfache Erweiterung der Energiebilanzgleichung dar.

Schwieriger zu berücksichtigen sind Prozesse, die Energie der Wellen vernichten. Hier kommen folgende Wechselwirkungsvorgänge in Frage: Reibung, verstärkt durch Bodenrippel; Perkolation, verursacht durch die Permeabilität von Sandboden; welleninduzierte Bewegungen elastischen Bodenmaterials, z.B. von Schlick und Streuung des Seegangs an Großrippeln. Außerdem spielen verstärkt nichtlineare Wechselwirkungseffekte wegen der zunehmenden Wellensteilheit eine Rolle. Messungen und Abschätzungen der Einzeleffekte, sowie Vorschläge, wie man sie durch Einbau entsprechender Quellfunktionen in der Energiebilanzgleichung berücksichtigen kann, finden sich in [8].

Da die meisten der genannten Prozesse von der Bodenbeschaffenheit abhängen und diese örtlich stark unterschiedlich sein und sich mit der Zeit verändern kann, wird man zunächst größere Seegebiete mit einheitlichen Dämpfungsgesetzen beschreiben.

Abb. 4 zeigt, wie sich ein willkürlich angenommenes Spektrum durch Shoaling und gleichzeitige Dämpfung auf einer Laufstrecke von 250 km bzw. 1 km verändert, wenn der Boden von 50 m auf 10 m Wassertiefe, bzw. von 10 m auf 6 m ansteigt. Das entspricht etwa dem Verlauf des Bodenprofils westlich Sylt. Dabei wird angenommen, daß kein Wind den Seegang längs der Laufstrecke anfacht, was aber in den häufigen Westwindlagen der Fall sein wird.

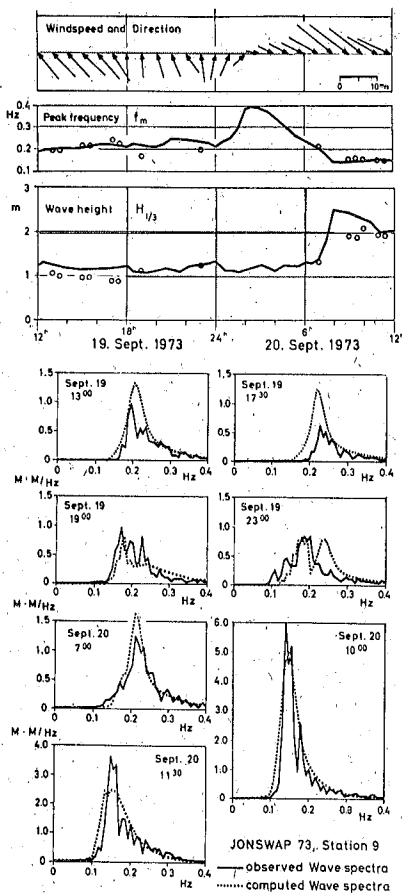


Abb. 3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Wellenparametern bzw. Spektren

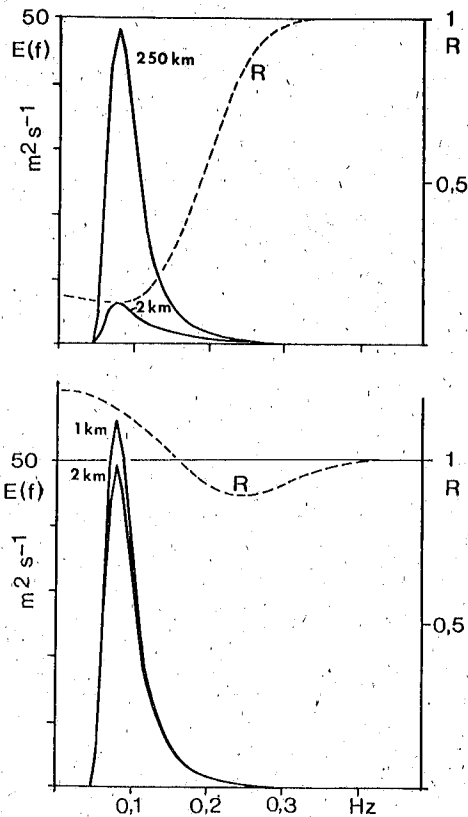


Abb. 4: Berechnete Spektren verursacht durch Shoaling (Aufsteilen) bzw. Dämpfung

Den Berechnungen wurde ein exponentielles Dämpfungsgesetz

$$E = \frac{v_a}{v} E_a \cdot e^{-D\xi} \quad \text{with} \quad \xi = \int_v^x \frac{k^2 dx}{(2\pi F)^2 \cosh^2(kh)}$$

zugrundegelegt, wie es aus Messungen der Dünungsdämpfung (s. Abb. 1) ermittelt wurde ($k = 2\pi/L =$ Wellenzahl, $h =$ Wassertiefe, $v =$ Gruppengeschwindigkeit, Index a kennzeichnet den Zustand am Anfang der Laufstrecke, $D \approx 0,04 =$ Dämpfungskoeffizient). Man nimmt an, daß die Wellendämpfung vor Sylt überwiegend durch Perkolation verursacht wird. Der Dämpfungsfaktor

$$R = \frac{v_a}{v} \cdot e^{-D\xi} \quad (E = RE_a)$$

wurde ebenfalls aufgetragen.

Man erkennt, daß im allgemeinen die Dämpfung überwiegt. Steigt der Boden jedoch auf kurzer Strecke stark an, kann das Aufsteilen der Wellen durch Shoaling den Dämpfungseffekt überkompensieren und eine vorübergehende Zunahme der Wellenhöhe bewirken, wie sie im Fall der Dünung in Abb. 1 zwischen 2 km und 1 km Entfernung (Wassertiefe 10 m und 6 m) tatsächlich gemessen wird.

Interessant ist, daß die Dämpfung nicht ausschließlich den langwelligen Teil des Spektrums betrifft. So wird der Seegang beim Einlaufen in flaches Wasser nicht zunehmend kurzwelliger, sehr wohl aber niedriger als bei vergleichbaren Fetch-Bedingungen in Tiefwasser.

Die Grundlagen eines Seegangsberechnungsverfahrens für Flachwasser werden Ende 1980 vorliegen. Nach einer Erprobungszeit von weiteren 1 – 2 Jahren könnte das Verfahren auch für eine routinemäßige Seegangsvorhersage für die Nordsee eingesetzt werden.